

## **TESINA D'ESPECIALITAT**

### **Títol**

**ADAPTACIÓ DELS INSTRUMENTS D'ANÀLISI DE XARXES DE  
TRANSPORT PER A LA MODELITZACIÓ HISTÒRICA.  
ANÀLISI DE LA XARXA FERROVIÀRIA DE BARCELONA**

### **Autor/a**

**LLUC HOMS GALBIS**

### **Tutor/a**

**DANIEL RODRÍGUEZ ARANDA**

**EDUARD J. ALVAREZ PALAU**

### **Departament**

**ITT - DEPARTAMENT D'INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORT I DEL  
TERRITORI**

### **Intensificació**

**TRANSPORTS**

### **Data**

**JUNY 2016**

## **AGRAÏMENTS**

Vull expressar primer de tot el meu agraïment vers els tutors, el professor Daniel Rodríguez Aranda, i el Dr. Eduard J. Alvarez Palau, per la seva dedicació i suport durant la realització del treball. Tots els seus consells i lliçons magistrals, m'han ajudat a entendre gran quantitat de conceptes i metodologies i a trobar l'enfocament correcte en els moments de més dubtes.

També a tots els amics que m'han ajudat sempre en els moments més complicats, fent-me costat i sense estalviar paraules de suport i confiança cap a mi. Amb una menció especial per aquells amb qui he compartit el camí universitari, Roger, Víctor i Sergi, ja que junts ha estat possible assolir aquesta meta.

A la meva família, per no deixar mai de fer-me costat en tots aquests anys, i sobretot a la meva parella, la Silvia, amb qui més he compartit les alegries i els moments bons i que alhora sempre ha estat amb mi en els moments dolents donant-me forces per superar les adversitats.

Per últim vull agrair la tasca desinteressada de la Rosa, col·laborant amb gran quantitat d'informació, i atenent-me sempre molt amablement.

Gràcies sinceres a tots,

Lluc Homs Galbis

Juny de 2016

# ADAPTACIÓ DELS INSTRUMENTS D'ANÀLISI DE XARXES DE TRANSPORT PER A LA MODELITZACIÓ HISTÒRICA

## ANÀLISI DE LA XARXA FERROVIÀRIA DE BARCELONA

**Autor: Lluç Homs Galbis**

**Tutor: Daniel Rodríguez Aranda**

**Tutor extern: Eduard J. Alvarez Palau**

### RESUM

PARAULES CLAU: Modelització història, indicadors d'oferta, GIS.

A l'hora de realitzar estudis de les xarxes ferroviàries, en la bibliografia hi ha informació detallada sobre els diferents trams de línia posats en servei, amb les poblacions de sortida i arribada, però la mateixa informació referent a les estacions sol ser escassa, i sovint inclús confusa. El mateix passa amb dades del tipus operacional com són freqüències o horaris de pas.

En la història recent i més a partir de la proliferació de les eines informàtiques, aquesta manca ha deixat d'existir, però en el moment de realitzar estudis sobre l'evolució històrica de les xarxes de transport, és necessari retrocedir a èpoques passades on la mancança s'agreuja quan més gran és l'espai de temps transcorregut.

És aleshores quan la falta d'informació esdevé un problema, el qual s'acaba resolent assumint diverses simplificacions que permeten calcular indicadors en base a paràmetres dels qual sí que es disposa d'informació. Tota simplificació però, porta un error associat, el qual s'ha d'acceptar si es vol continuar endavant amb l'estudi, però que convé tenir present.

En aquesta línia, el present estudi s'enfoca des de tres vessants complementàries entre elles:

Una primera part on es fa un recull exhaustiu de dades referents a la xarxa ferroviària de Barcelona, incloent-hi la informació de totes les estacions, i es genera un model GIS amb tota aquesta informació.

Una segona part on s'elaboren models per al càlcul simplificats de diferents indicadors d'oferta (cobertura, accessibilitat, dotació...), a partir dels models emprats habitualment en la modelització de xarxes de transport.

Finalment s'apliquen les diferents definicions de cada model a la reconstrucció de la xarxa, per obtenir resultats de forma exacta i aproximada, amb l'objectiu de poder estimar l'error comés en cadascuna de les simplificacions.

# ADAPTACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS DE ANÁLISIS DE REDES DE TRANSPORTE PARA LA MODELIZACIÓN HISTÓRICA

## ANÁLISIS DE LA RED FERROVIARIA DE BARCELONA

**Autor: Lluç Homs Galbis**

**Tutor: Daniel Rodríguez Aranda**

**Tutor externo: Eduard J. Alvarez Palau**

### RESUMEN

PALABRAS CLAVE: Modelización histórica, indicadores de oferta, GIS

A la hora de realizar estudios de las redes ferroviarias, en la bibliografía hay información detallada sobre los diferentes tramos de línea puestos en servicio, con las poblaciones de salida y llegada, pero la misma información referente a las estaciones suele ser escasa, y a menudo confusa. Lo mismo ocurre con datos de tipo operacional como son frecuencias u horarios de paso.

En la historia reciente y más a partir de la proliferación de las herramientas informáticas, esta falta ha dejado de existir, pero en el momento de realizar estudios sobre la evolución histórica de las redes de transporte, es necesario retroceder a épocas pasadas donde la carencia se agrava cuando mayor es el espacio de tiempo transcurrido.

Es entonces cuando la falta de información se convierte en un problema, el cual se acaba resolviendo asumiendo varias simplificaciones que permiten calcular indicadores en base a parámetros de los que sí se dispone de información. Toda simplificación pero, lleva un error asociado, el cual debe aceptarse si se quiere seguir adelante con el estudio, pero que conviene tener presente.

En esta línea, el presente estudio se enfoca desde tres vertientes complementarias entre ellas:

Una primera parte donde se hace una recopilación exhaustiva de datos referentes a la red ferroviaria de Barcelona, incluyendo la información de todas las estaciones, y se genera un modelo GIS con toda esta información.

Una segunda parte donde se elaboran modelos para el cálculo simplificados de diferentes indicadores de oferta (cobertura, accesibilidad, dotación...), a partir de los modelos empleados habitualmente en la modelización de redes de transporte.

Finalmente se aplican las diferentes definiciones de cada modelo a la reconstrucción propia de la red para obtener resultados de forma exacta y aproximada, con el objetivo de poder cuantificar el error cometido en cada una de las simplificaciones.

# ADAPTATION OF THE ANALYSIS TOOLS OF TRANSPORTATION NETWORKS FOR HISTORIC MODELLING

## ANALYSIS OF THE RAILWAY NETWORK OF BARCELONA

**Author: Lluç Homs Galbis**

**Tutor: Daniel Rodríguez Aranda**

**External tutor: Eduard J. Alvarez Palau**

### SUMMARY

KEY WORDS: Modelling history, supply indicators, GIS

In the study of rail networks, detailed information about the different sections of line commissioned, with locations of departure and arrival can be found in literature and historical documentation. However, the information concerning the stations is often poor, and even confusing. The same difficulty applies to operational data such as pass frequencies or pass schedule.

In recent history, thanks to the development of IT tools, this issue longer exists. However, in order to study the historical development of transport networks, it is necessary to go back to the past where the difficulties concerning the lack of information are exacerbated the more time has passed.

It is at this point, that the lack of information becomes a problem. This problem can be solved by assuming several simplifications, which allow the calculation of indicators based on known parameters taken from information that is available. Nevertheless, any simplification carries an associated error rate, which must be accepted in order to go ahead with the study, but should be kept in mind.

Consequently, the present study focuses on three complementary aspects:

A first part, in which an exhaustive data collection concerning Barcelona's rail network, including information on all of the stations, is undertaken. A GIS model is generated with all this information.

A second part where the simplified calculation models for different supply indicators (coverage, accessibility, provision...), based on models commonly used in modelling of transport networks, are produced.

Finally, a third part where all the different definitions of each model are applied with the purpose of obtaining both accurate and approximate results, so as to be able estimate the error rate in each simplification applied.

## Índex

Índex.....	6
1 Introducció .....	8
2 Estat de l'art .....	12
2.1 La xarxa ferroviària de Barcelona.....	12
2.1.1 Xarxa de via ampla - RENFE .....	12
2.1.2 Xarxa de via estreta - FGC.....	19
2.1.3 Xarxa de Metro de Barcelona .....	24
2.2 Modelització de xarxes de transport.....	29
3 Dades.....	31
3.1 Territori .....	31
3.2 Xarxa ferroviària .....	33
4 Indicadors.....	36
4.1 Longitud de xarxa .....	38
4.2 Fractalitat .....	39
4.2.1 Mètodes de càlcul de l'indicador de fractalitat.....	42
4.2.2 Particularitats de càlcul de l'indicador de fractalitat.....	44
4.3 Cobertura .....	45
4.3.1 Mètodes de càlcul de l'indicador de cobertura.....	46
4.4 Densitat i Dotació .....	48
4.5 Accessibilitat.....	49
4.5.1 Metodologia de càlcul per a l'indicador d'accessibilitat .....	51
5 Anàlisis i Resultats .....	56
5.1 Longitud de xarxa .....	56
5.2 Fractalitat .....	59
5.2.1 Fractalitat en base al número d'estacions.....	59
5.2.2 Fractalitat en base a la longitud de xarxa.....	63
5.3 Cobertura .....	67

---

5.3.1 Estacions amb àrees d'influència .....	67
5.3.2 Línies amb àrees d'influència calculades amb GIS .....	69
5.3.3 Línies amb àrees d'influència geomètriques .....	70
5.3.4 Municipis .....	71
5.3.5 Comparatiu .....	73
5.4 Densitat i Dotació .....	79
5.5 Accessibilitat.....	82
5.5.1 Consideracions referents als mètodes de càlcul de l'accessibilitat.....	84
5.5.2 Anàlisi dels resultats de l'accessibilitat .....	88
6 Conclusions .....	91
7 Referències Bibliogràfiques.....	95
Índex de Taules.....	98
Índex de Figures .....	100
ANNEXOS.....	101
ANNEX 1 Plànols Fase de Reconstrucció .....	102
ANNEX 2 Plànols Fase Anàlisi .....	110

## 1 Introducció

Amb la revolució industrial a finals del segle XVIII, a Europa comença un canvi que modifica el comportament de la societat, modificant el model territorial present. Amb el creixement de les ciutats al segle XIX, i el desenvolupament de nous elements de transport, es comencen a implantar xarxes de transport per connectar les principals ciutats europees, que ràpidament protagonitzen un fort creixement.

Aquesta expansió es va veure alterada al segle XX amb les importants guerres que caracteritzen la primera meitat d'aquest segle. Tot i això algunes vies de transport van jugar un paper clau en els enfrontaments bèl·lics, alhora que altres van ser destruïdes com a part de l'estratègia.

Entrada la segona meitat de segle, el desenvolupament de la societat es reprèn i augmenta exponencialment en tots els sectors, fins a l'actualitat. En particular les xarxes de transport tornen a tenir un paper clau en l'afavoriment d'aquest.

És a la dècada dels 70, degut a l'elevat cost que suposa la implantació, operació i manteniment dels elements de les xarxes, que sorgeix la necessitat d'elaborar estudis que optimitzin les actuacions a realitzar, potenciant les inversions més favorables per als sistemes de transport i com a conseqüència, per al conjunt de la població.

Com a punt de partida, s'ha d'entendre el sistema de transport com un element dinàmic el qual influeix sobre el desenvolupament de la societat, el territori i les activitats que s'hi desenvolupen, i alhora, que aplicant diferents actuacions es pot influir sobre el conjunt territorial, creant una cadena d'accions i reaccions que afecten a llarg termini.

Els estudis realitzats per l'enginyeria del transport, serveixen com a base en la presa de decisions sobre les actuacions a dur a terme en les diferents xarxes.

Per fer-ho desenvolupen models de càlcul cada cop més sofisticats, recolzats en la gran quantitat de dades que es recullen diàriament i en la disponibilitat d'eines informàtiques i de processament. Aquests models permeten treballar amb gran quantitat de paràmetres i estudiar amb un alt grau de precisió les xarxes de transport actuals i introduir-hi les futures actuacions per valorar-ne els efectes que ocasionaran en el territori.

Alhora, seguint el concepte de sistema dinàmic, convé fer una retrospectiva i veure com s'ha arribat a l'escenari present intentant aplicar les mateixes eines en l'anàlisi de la xarxa primitiva des dels seus orígens, per tal de descriure'n el comportament evolutiu i tenir-lo en compte en el procés de presa de decisions.



És en aquest punt on es genera el principal problema, ja que el binomi entre disponibilitat de dades i disponibilitat d'eines de càlcul es desequilibra per una mancança severa en la primera.

En una societat preocupada per subsistir, superar malalties i epidèmies, i envoltada constantment de l'ombra de la guerra, la preocupació per la presa de dades no era tema prioritari. Alhora la falta de tecnologia de tractament d'informació en complicava la posterior conservació. Fet que fa que avui en dia la disponibilitat sigui baixa, i la informació que es recupera sorgeix d'hores d'investigació per part d'historiadors, tècnics i professionals.

En particular, en matèria ferroviària es conserven dades relatives a la posada en servei dels diferents trams de línia, sovint coneguts amb el nom entre les poblacions situades als seus extrems, però si es passa a analitzar les diferents estacions, el tema esdevé complicat. Convé fer èmfasi en que l'estació és l'element que permet l'accessibilitat a la xarxa, per tant esdevé molt important per valorar-ne la servitud.

La informació relativa a estacions a part de ser escassa, també és sovint confusa i/o contradictòria. En primer lloc perquè, l'estació és un element que permet variabilitat, podent obrir o tancar estacions dins una línia de ferrocarril amb facilitat, de manera que la línia es manté sempre oberta, però les estacions d'aquesta canvien. Alhora hi ha estacions que canvien de tipologia, podent ésser exclusives de mercaderies, de viatgers o bé mixtes de manera que esdevé complicat saber en quin moment han canviat de servei.

En segon lloc, la concepció de les estacions ha evolucionat molt des de la implantació del sistema ferroviari. Antigament només les principals ciutats tenien estacions amb edificacions. Moltes estacions consistien en els denominats baixadors, amb les variants populars de *paraderu* o *debarcadero*, amb una estructura física molt reduïda i en alguns casos inexistent.

La mateixa problemàtica es troba en la informació de caràcter operacional, com són horaris i freqüències de pas, o velocitats comercials.

En aquest punt, només es pot optar per girar sobre els passos avançats i començar a aplicar simplificacions en els mètodes, per tal d'adequar-los al material del què es disposa, assumint una pèrdua de precisió que comportarà una variació en els resultats finals.

A més s'entra en la paradoxa que un cop assumides les simplificacions, davant de la falta en alguns casos de temps i recursos, s'opta per utilitzar aquestes mateixes alternatives de càlcul en estudis sobre èpoques més recents, on si que hi ha disponibilitat de dades, per ser més ràpides i de més fàcil aplicació.

Però fins a quin punt és tolerable? Quina precisió tindran els resultats?

En busca de la resposta a aquestes preguntes, i amb tot el descrit anteriorment, en aquest treball, primerament es pretén modelitzar de forma exhaustiva una xarxa de transport des de la seva primera implementació fins a l'actualitat, per posteriorment aplicar-hi una sèrie

d'indicadors, els quals es calcularan amb definicions exactes i simplificades, per veure les variacions que pateixen arran de les mateixes.

Per fer-ho s'utilitzaran eines *GIS*<sup>1</sup> aplicades a la modelització històrica, els denominats models *HGIS*, i que s'expliquen en detall en el capítol 2.2.

Com a element de transport es considera el ferrocarril per a servei de viatgers, tant de via ampla com de via estreta, la xarxa de metro de Barcelona i els diferents funiculars i cremalleres. Les línies exclusivament de mercaderies no s'inclouen.

A continuació es detalla el procés seguit en el present estudi:

1) Delimitació espacial i temporal de l'estudi:

Tot i que la idea inicial parteix d'estudiar la infraestructura a la Regió Metropolitana de Barcelona, com tants d'altres estudis han fet, en aquest cas s'aposta pel límit provincial.

Amb aquesta ampliació es pretén abastar una superfície prou extensa per poder-hi trobar diverses casuístiques i funcionalitats de la xarxa, i alhora prou reduïda per poder dur a terme l'estudi amb una càrrega de temps i recursos d'acord amb la condició del treball acadèmic. Alhora permet la reducció a àmbits més concrets, com la pròpia ciutat de Barcelona o la Regió Metropolitana, en certs moments en que es consideri oportú analitzar la diferència entre diferents entorns.

En l'àmbit temporal, el límit el posa el propi desenvolupament de la xarxa, des de la implantació de la primera línia, 1848<sup>2</sup>, fins a l'actualitat. Per tant l'estudi es comença al 1850 i acaba al 2010, dividint aquest temps en 9 intervals de 20 anys cada un.

2) Obtenció de dades i introducció en el model HGIS:

En aquesta etapa s'ha hagut de fer un recopilatori de totes les dades necessàries a partir de fonts, les quals es descriuen al capítol 3, sobre la estructura administrativa i poblacional del territori, i sobre la infraestructura ferroviària, així com les variables i paràmetres necessaris per a la modelització.

3) Modelització i càlcul d'indicadors:

La tercera etapa consisteix en l'estudi dels indicadors, començant per la lectura de la bibliografia de referència, passant per la creació dels models de càlcul simplificats i acabant per calcular-los amb les eines *GIS* a partir de les dades introduïdes prèviament.

---

<sup>1</sup> Acrònim de l'anglès *Geographic Information System*

<sup>2</sup> Línia entre Barcelona i Mataró.

L'explicació dels indicadors escollits i les respectives simplificacions es recullen al capítol 4.

4) Interpretació dels resultats obtinguts:

Finalment la interpretació dels resultats obtinguts, focalitzant en les diferències causades per les simplificacions adoptades, a partir dels plànols, gràfics i taules obtinguts en el procés de càlcul.

Aquesta tasca es recull en el capítol 5, i en els respectius annexos, s'adjunten tots els càlculs realitats en cada període.

Amb tot, independentment dels resultats obtinguts, en cap cas es pretén jutjar cap estudi previ on s'hagi aplicat alguna de les metodologia de càlcul analitzades, simplement servirà per quantificar les diferències en els mètodes de càlcul de manera objectiva, i com a punt d'atenció a l'hora de definir i plantejar nous treballs.

## 2 Estat de l'art

### 2.1 La xarxa ferroviària de Barcelona

La xarxa de ferrocarril a Catalunya, nascuda al 1848, va protagonitzar una ràpida expansió durant la segona meitat del segle XIX, posant-se en marxa la majoria de les grans línies amb pocs anys de diferència.

La xarxa amb estructura completament radial i amb centre a la ciutat de Barcelona, conserva la seva essència actualment, doncs bona part dels traçats de les línies es corresponen amb els originals.

A continuació es presenta un resum sobre la història de la xarxa ferroviària a Barcelona, des dels seus inicis fins a l'actualitat, recollint majoritàriament les dates de construcció i posada en servei dels diferents trams de línia i les seves estacions.

#### 2.1.1 Xarxa de via ampla - RENFE

##### Línia Barcelona - Mataró

La primera línia de ferrocarril de Barcelona i del territori peninsular espanyol, va ser inaugurada el 28 d'octubre de 1848, connectant Barcelona amb Mataró.

Aquesta línia va ser concebuda per Miquel Biada i Bunyol, empresari i comerciant català emigrat a Amèrica durant la primera meitat del s.XIX, on va poder conèixer de primera mà les locomotores, que a La Habana es feien servir per transportar el sucre des de les províncies agrícoles cap als ports principals per exportar-lo per via marítima.

Biada havia fet fortuna com a comerciant i va idear l'aplicació d'aquesta tecnologia, de fabricació britànica, per fer una línia que connectés Barcelona amb la seva ciutat natal, Mataró. Al 1845 es va associar amb Josep Maria Roca, un grup d'enginyers anglesos i alguns dels seus contactes del món financer de la seva etapa a Amèrica, per formar la "*Sociedad del Camino de Hierro de Barcelona a Mataró y vice-versa*" la qual començava els treballs de construcció al 1847.

La línia unia Barcelona amb Mataró seguint un traçat paral·lel a la façana litoral de 29 km de longitud, amb un recorregut sense massa complicacions tècniques, tret d'un pont sobre el riu Besòs i un túnel a l'alçada de Montgat.

### Línia Barcelona - Granollers

La segona línia en entrar en servei va unir Barcelona amb Granollers, ubicant la seva estació capçalera a la vora de la de la línia Barcelona a Mataró, però dins el recinte emmurallat de la ciutat de Barcelona, al mateix lloc on es troba l'actual Estació de França.

La línia va ser construïda per la *"Sociedad de los Caminos de Hierro del Norte"*, que posteriorment canviaria el nom pel de *"Ferrocarril de Barcelona a Granollers"*, i va entrar en servei el 23 de juliol de 1854.

A diferència de la primera aquesta línia va ser concebuda per al transport de mercaderies provinents dels sectors agrícoles, cap a la ciutat de Barcelona. Les seves estacions van ser originàriament l'estació terminal a Barcelona, Clot, Horta, Sant Andreu, Santa Coloma, Montcada i Reixac, Mollet, Montmeló i Granollers.

Tant el traçat original com les estacions es mantenen en l'actualitat, amb les seves respectives remodelacions, a excepció de les estacions d'Horta i Santa Coloma, que foren clausurades a principis del segle XX per la seva llunyania respecte els centres de població respectivus.

### Línia Barcelona - Martorell

La línia Barcelona a Martorell va ser la tercera en posar-se en servei, unint en un primer moment Barcelona amb Molins de Rei, tram que va ser inaugurat el 26 de novembre de 1854. Posteriorment, el 10 de novembre de 1856 la línia va arribar a les Coromines i el 23 de juny de 1859 ho va fer definitivament a Martorell, travessant el Riu Llobregat.

L'estació de partida se situà en terrenys coneguts aleshores com la Riera d'en Malla, que avui dia correspon a Rambla Catalunya cantonada amb Ronda Universitat. La línia va ser construïda per la *"Compañía de los Caminos de Hierro del Centro de Cataluña"* que va construir el primer tram fins a Molins de Rei i després va canviar el nom a *"Compañía del Ferrocarril de Barcelona a Martorell"*, la qual va construir el segon tram fins a Martorell.

Impulsada per empresaris de la indústria tèxtil de Martorell, la línia contava inicialment amb les estacions de Barcelona - Riera d'en Malla, La Bordeta (pròxima a l'actual Estació de Sants), l'Hospitalet de Llobregat, Cornellà, Sant Joan Despí, Sant Feliu de Llobregat, Molins de Rei, El Papiol i Martorell, primer a les Coromines com estació provisional i després a Martorell finalment.

### Línia Barcelona - Saragossa

La quarta línia posada en funcionament va ser la que havia d'unir Barcelona amb Saragossa, construïda per la *"Compañía del Ferrocarril de Barcelona a Zaragoza"*, es va posar en servei

entre Montcada i Sabadell el 2 de maig de 1855. La línia inicialment aprofitava la recent implantació de la línia Barcelona - Granollers per, des de Montcada sortir amb un nou ramal cap a Sabadell, fet que feia que aquesta fos la primera línia sense estació pròpia a Barcelona.

Posteriorment, el 16 de març de 1856 la línia arribava a Terrassa i el 18 de juliol de 1859 ho feia a Manresa, amb estacions a Montcada i Reixac - Manresa, Cerdanyola, Barberà, Sabadell, Terrassa, Sant Miquel de Gonerres, Viladecavalls, Olesa de Montserrat, Vacarisses, Monistrol de Montserrat, Sant Vicenç de Castellet i Manresa.



Figura 2.1.1 Plànol de Barcelona al 1856 amb els accessos de les línies ferroviàries existents.

Font: Cartoteca Digital de l'ICGC.

### Perllongament de les 4 grans línies

La línia de Barcelona a Mataró va ser prolongada seguint la costa fins a Arenys de Mar el 10 de gener de 1857, posteriorment va arribar a Tordera el 3 de desembre de 1859 amb un traçat que s'endinsava cap al interior, després d'un gir de 90º al límit provincial entre Barcelona i Girona.

Finalment el 17 de març de 1862 es va inaugurar el curt tram entre Tordera i Maçanet - Massanes, on s'hi va instal·lar una estació d'enllaç entre aquesta línia i la de l'interior. L'estació quedava lluny dels nuclis urbans de Maçanet i Massanes, per això primer es va denominar "Empalme", després Riera de Santa Coloma i finalment Maçanet - Massanes.

Paral·lelament la línia de Barcelona a Granollers va ser allargada fins a Maçanet – Massanes, entrant en funcionament aquest nou tram el primer de setembre de 1860, possibilitant l'enllaç entre línies citat anteriorment.

Més tard la línia, ja unificada, arribaria a Girona el 3 de març de 1862 i posteriorment a Figueres al 1877, per acabar a la frontera amb França al 1878.

Per la seva banda, la línia de Barcelona a Manresa es prolongava cap al oest, arribant l'1 de maig de 1860 a Lleida i finalment el 18 de setembre de 1861 a Saragossa. Des d'allà, la línia va ser connectada més tard amb les línies de Pamplona i Alsasua i en conseqüència Barcelona quedava connectada amb dues grans capitals: Madrid i París.

El fet de compartir l'accés a Barcelona amb el ferrocarril de Granollers, va resultar insuficient per l'augment de trànsit, motiu pel qual es va començar a treballar en la implantació d'una estació terminal pròpia a Barcelona. Aquesta s'havia de situar en uns terrenys pròxims al Pla de Palau, però l'oposició de l'ajuntament a que el tren entrés al recinte emmurallat, va fer que finalment se situés a l'actual Estació del Nord, anomenant-se en un primer moment Barcelona - Vilanova, degut al nom del carrer on es trobava.

El 21 de març de 1862 s'inaugurava el nou ramal d'accés permetent la independència de les línies de Barcelona a Saragossa i Barcelona a Girona.

Per últim la línia entre Barcelona i Martorell es va ampliar fins a Vilafranca del Penedès i fins a Tarragona, entrant en servei aquest llarg tram el 15 d'abril de 1965.

#### Línia Barcelona - Sarrià

El 23 del de juny de 1863 entrava en servei una petita línia construïda per la "*Compañía del Ferrocarril de Barcelona a Sarrià*" (FSB), amb una longitud inferior a 5 km, que unia els municipis de Sarrià, Gràcia i Sant Gervasi amb Barcelona, on s'ubicà una nova estació molt propera a la de la línia de Barcelona a Martorell, on futurament s'emplaçaria la Plaça Catalunya.

Aquesta línia va ser remodelada i dotada d'ample internacional al 1905.

#### Línia Barcelona - Vic

La línia va ser concebuda de Barcelona a Sant Joan de les Abadesses per transportar el carbó de les mines pirenaïques fins a la ciutat comtal. El primer tram entre Granollers i Vic es va inaugurar el 12 de març de 1876, i el segon entre Vic i Ripoll i Sant Joan de les Abadesses el 17 d'octubre de 1880. Tota la línia es va connectar amb la línia de Barcelona a Girona per arribar a la capital catalana al 1883 a l'alçada de Granollers.

L'11 d'abril de 1886 entrava en servei una línia pròpia entre Granollers i Montcada per enllaçar amb la línia de Manresa i entrar per aquesta fins a Barcelona.

En successives ampliacions cap al nord, la línia va arribar fins a Ribes de Freser al 1919, a Puigcerdà al 1923 i fins La Tor de Querol al 1929 per continuar cap a França.

#### Línia Mollet – Caldes de Montbui

El turisme dels balnearis a la zona de Caldes de Montbui va propiciar la creació d'una línia ferroviària entre Mollet i Caldes de Montbui, de 14 km de longitud, la qual fou posada en servei el 14 de juliol de 1880. Alhora, també permetia transportar producte agrícoles i llambordes de les pedreres de la zona fins a Barcelona, gràcies a l'enllaç amb la línia de Barcelona a la Frontera a l'estació de Mollet Sud - França.

La línia però, no va resultar suficientment rentable en el moment de crisi econòmica i davallada del negoci dels balnearis, i va ser clausurada el 13 de febrer de 1932, degut a les pèrdues econòmiques que generava.

#### Línia Barcelona - Vilanova - Valls

La línia de Barcelona a Reus va ser la cinquena gran línia radial amb origen a Barcelona en ser inaugurada. Va ser construïda per la "*Sociedad Anónima de los Ferrocarriles de Valls a Villanueva y Barcelona*", posant en servei el 29 de desembre de 1881 el tram comprés entre Barcelona i Vilanova i la Geltrú. L'arribada a Barcelona es va concebre amb una nova estació en terrenys ubicats a les Hortes de Sant Bertran, propers al que avui dia són les Drassanes.

Posteriorment, el 16 d'abril de 1882, la línia es perllongava fins a Calafell, creuant-se amb la línia ja existent de Barcelona a Martorell, Vilafranca i Tarragona. No va ser però, fins 1887, que es va construir l'estació de connexió entre les dues línies a Sant Vicenç de Calders.

La línia arribaria el 31 de gener de 1883 a Valls i cinc mesos més tard s'obriria el tram entre Valls i Picamoixons, permetent la connexió amb la línia ja existent de Lleida a Reus i Tarragona.

Amb la inauguració de la connexió a Sant Vicenç de Calders, quedava conformat el denominat "vuit català", format per les quatre grans línies ferroviàries amb origen a Barcelona i enllaçades de dos en dos a Maçanet - Massanes i a Sant Vicenç de Calders, tot dibuixant un gran vuit en la geografia catalana, discorrent dues d'elles arran de costa i les altres dues paral·leles a les primeres però per l'interior.



### Milliores de finals del segle XIX i durant el segle XX

A les darreries del segle XIX i durant el segle XX, després de la frenètica expansió de totes les línies, un seguit de reestructuracions i remodelacions van tenir lloc per tal d'afavorir el trànsit ferroviari i, alhora, no suposar una barrera arquitectònica perjudicant el creixement dels pobles i ciutats.

La majoria d'actuacions van consistir en el soterrament de línies i estacions, i en alguns casos la reubicació d'aquestes a poca distància de les seves antecessores. Però també es van dur a terme actuacions més importants, com l'obertura de nous ramals i connexions entre línies en estacions estratègiques per esdevenir pols ferroviaris, principalment a Barcelona, i com a segon exemple, però en menor escala, a Manresa.

### **Reordenació del trànsit ferroviari a la ciutat de Barcelona**

El 1882 es va completar el traçat en rasa pel carrer Aragó, que unia les línies de Martorell amb les de Girona i Manresa, deixant fora de servei l'estació de Riera d'en Malla.

El 1887 es va posar en servei l'enllaç entre el Prat de Llobregat i la Bordeta, evitant el pas dels trens per la carretera del Morrot, i esdevenint l'Estació de França punt de partida de tots els trens de la línia de Vilanova.



Figura 2.1.2 Configuració de les línies ferroviàries a la ciutat de Barcelona al 1906.

Font: Cartoteca Digital de l'ICGC.

Aquesta estació va ser remodelada completament al 1929 amb motiu de l'Exposició Universal, propiciant el tancament de l'estació de Rodalies (primera estació de la línia Barcelona - Mataró) i passant el trànsit a la nova Estació de França.

Al 1917 es creava el Morrot, com a gran estació de mercaderies en terrenys guanyats al mar, tot aprofitant les instal·lacions i el traçat que havia deixat la línia de Barcelona a Vilanova. Juntament amb l'estació de la Sagrera, inaugurada al 1918, van ser les dues grans estacions de mercaderies de la ciutat de Barcelona.

Als anys seixanta es va construir el ramal Besòs, que permetia el trànsit dels trens de la línia de Mataró per la línia de Girona.

El ramal de les Aigües, construït a Montcada, que connectava les línies de Manresa i Vic amb la línia de Girona, va ser inaugurat al 1972, coincidint amb la remodelació de l'estació del Clot - Aragó i el tancament de l'estació del Nord.

Al 1989 es clausurava l'Estació de França i el ramal de Marina amb les seves estacions de Bogatell, Poblenou, per deixar lloc a la Vila Olímpica, i la construcció de la Ronda Litoral.

#### Línia Castellbisbal / Papiol – Mollet

La línia amb orígens a Castellbisbal i el Papiol fins a Mollet, va ser concebuda per evitar el pas de trens de mercaderies per la ciutat de Barcelona, entrant en funcionament al 1982. Tot i que se'n van construir diverses estacions, no va ser fins 1995 que es va obrir també al trànsit de viatgers entre Cerdanyola i Cerdanyola Universitat.

Més tard, al 2005, s'obrien al públic les estacions de Sant Cugat i Rubí, donant servei a viatgers en el tram entre Cerdanyola i Castellbisbal, per connectar amb les respectives línies cap a Martorell i Terrassa.

Entre 2008 i 2010 es va adaptar la línia a ample mixt, permetent el pas de trens amb ample ibèric i trens d'ample UIC, connectant amb la línia d'Alta Velocitat, i posteriorment, al 2011, la línia quedava oberta en tot el seu recorregut per servei de viatgers, entre Castellbisbal i Mollet del Vallès, amb les estacions ja existents al 2005.

A més d'aquestes estacions, també hi ha construïdes dues estacions més al *Baricentro* (Barberà del Vallès) i a Santa Perpètua, però actualment encara no donen servei i resten tancades al públic.

### 2.1.2 Xarxa de via estreta - FGC

#### Línia Manresa - Castellar de n'Hug

El "*Ferrocarril Económico de Manresa a Berga*" fou la primera línia de via estreta construïda a Catalunya. El 10 de setembre de 1885 s'inaugurava el tram entre Manresa i Puig-Reig. Més endavant el creixement de la mineria a la comarca del Berguedà determinaria l'ampliació del ferrocarril fins a Guardiola de Berguedà, on va arribar el 21 de novembre de 1904.

Posteriorment, al 1914, també enllaçaria amb el petit ferrocarril que Asland construiria per transportar el ciment produït a la fàbrica del Clot del Moro a Castellar de n'Hug.

Ambdues línies, pensades sobretot per al transport de mercaderies, tenien també llicència per al servei de viatgers, degut a la possibilitat d'accedir a beneficis per part del govern de la època, i a tals efectes oferien serveis de línia regular que en bona part eren aprofitats pels treballadors de les colònies. Aquests accedien al tren des de petites estacions o baixadors, situats en cadascuna de les colònies i dels pobles de la vall, fet que feia que la línia de Manresa a Guardiola tingués un gran nombre de punts de parada en proporció a la seva longitud.

Durant la post guerra, les línies van entrar en període de decadència i la companyia patia series dificultats econòmiques que van propiciar el tancament progressiu de la línia des de Castellar de n'Hug fins a Manresa, entre 1963 i 1973. Un dels punts clau, també va ser la construcció del pantà de la Baells, que havia d'inundar la vall des de Berga fins més amunt de Fígols, i per conseqüent el traçat de la línia.

#### Línia Martorell - Igualada

Aquesta línia, entre Martorell i Igualada, va començar a ser projectada a principis de la dècada de 1850, però la seva construcció no va començar fins 4 dècades més tard, i concretament va entrar en servei el 29 de juliol de 1893.

El denominat "*Ferrocarril Central Catalán*" es va construir per comunicar les indústries tèxtils igualadines amb la resta del país, mitjançant l'enllaç amb els ferrocarrils de via ampla a l'estació de Martorell.

En una primera fase d'explotació degut a la dependència amb el ferrocarril de via ampla, no va resultar massa pròspera, però al 1912 la cosa canviaria amb l'arribada del ferrocarril de via estreta de Barcelona a Martorell, creant la nova estació de Martorell Enllaç, i permetent els primers trens directes entre Barcelona i Igualada.

### Línia Barcelona - Martorell

Tot i la existència de la línia de via ampla entre Martorell i Barcelona des de 1859, l'alt desenvolupament econòmic i social de la zona del Baix Llobregat, va acusar la manca de cobertura a totes les poblacions que no servia el ferrocarril, i en especial les del marge dret del riu. És per aquest motiu que un grup d'empresaris industrials es van mobilitzar, ja des de 1882 per construir una nova línia.

Després de moltes incerteses en quan a traçat, de problemes amb els períodes d'execució de les obres, i del traspàs de la concessió en diverses ocasions, el "*Camino de Hierro del Nordeste de España*" es va inaugurar el 29 de desembre de 1912 com una línia suburbana, però molt aviat assoliria un caràcter regional en produir-se la seva ja esmentada unió amb el F.C. Martorell-Igualada, ja que constituïren la comunicació directa entre unes comarques estretament lligades en el camp econòmic i social.

En una primera fase, l'estació terminal es situava a l'estació de la Bordeta, actualment coneguda com Magòria, però al 1926 es posava en marxa el nou tram, ja soterrat, fins a la Plaça Espanya. Al mateix any es posava en funcionament un ramal de mercaderies des de la Bordeta fins a l'estació del Morrot.

### Línia Martorell - Manresa

Arran de la unificació de les tres línies de la vall del Llobregat, amb la creació de la "*Compañía General de Ferrocarriles Catalanes*" (CGFC), aquesta es va fer càrrec de la unió física entre les línies amb la construcció de la línia entre Martorell i Manresa.

El primer tram entre Martorell i Monistrol de Montserrat es va inaugurar el 29 d'octubre de 1922 i el segon fins a Manresa va entrar en servei el 22 d'agost de 1924, juntament amb el ramal de Manresa a Súria.

Més tard, als anys, vuitanta i després del tancament de la línia de Manresa a Berga, es va construir un nou ramal entre Santpedor i Sallent.



Figura 2.1.3 Esquema de la xarxa antiga de la línia de Catalans per trams i dates d'inauguració.

Font: trenscat.cat

### Línia Barcelona - Vallès

La línia de Barcelona al Vallès neix amb la línia de Barcelona a Sarrià, reconvertida a ample UIC al 1905. Un cop absorbida la FSB per la companyia “*Ferrocarriles de Cataluña*” (FCC), aquesta va procedir amb l’expansió de la línia cap al Vallès.

El 26 d'octubre de 1917 es va inaugurar el tram fins a Sant Cugat, passant per sota de la muntanya de Collserola, el 13 de setembre de 1918 el tren es prolongava fins a Rubí i el 28 de desembre de 1919 arribava a Terrassa.

Un primer ramal s’obria l'1 de juny de 1922, de Sant Cugat a Sabadell Estació, i tres anys més tard, el 21 de setembre de 1925, entrava en servei el túnel fins a Sabadell Rambla. Posteriorment, l'1 de gener de 1954 es va inaugurar el segon ramal entre Gràcia i Avinguda Tibidabo, i el 5 d'octubre de 1974 entrava en servei el tercer ramal de Sarrià fins a Reina Elisenda.

El 28 de juliol de 2015 s'inaugura un nou tram de línia amb el perllongament entre Terrassa Rambla i Terrassa Nacions Unides, amb una estació al campus universitari, una d'intercanvi amb Rodalies i una última al nord de la ciutat.

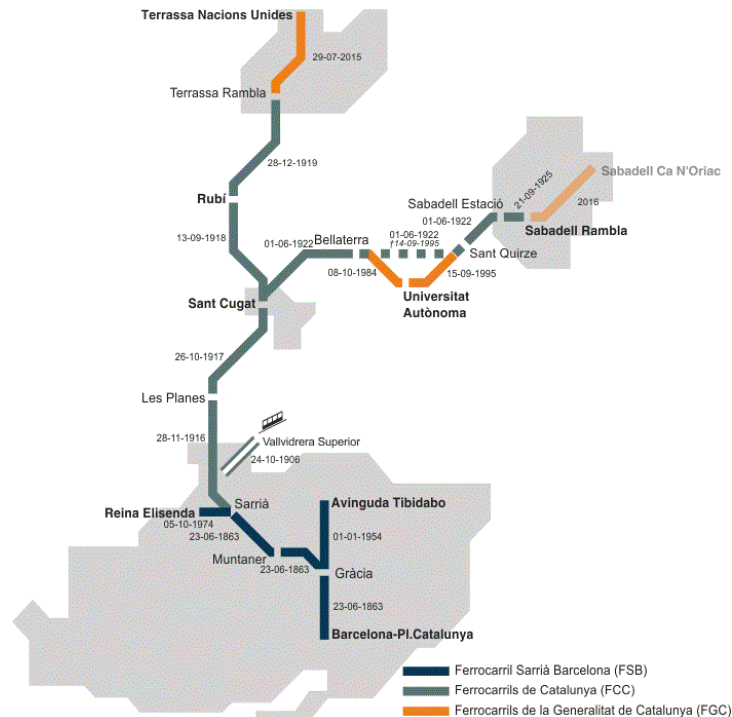


Figura 2.1.4 Esquema de la xarxa antiga de la línia del Vallès per trams i dates d'inauguració

Font: trenscat.cat

### La creació de FGC

Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya (FGC) es va constituir al 1979 per fer-se càrrec de les diverses línies, les quals ja havien estat transferides en varies ocasions.

Originàriament, la “*Sociedad del Tranvía o Ferrocarril Económico de Manresa a Berga*” (TFEMB) operava la línia de Manresa a Guardiola, la “*Compañía del Ferrocarril Central Catalán*” (CC) operava la d'Igualada a Martorell i la “*Sociedad de Caminos de Hierro del Nordeste de España*” (NEE) ho feia a la línia de Barcelona a Martorell.

La concessió d'aquesta última ja havia anat canviant de mans abans de la seva construcció, doncs en un primer moment pertanyia al “*Crédito Marítimo*”, propietat dels empresaris que impulsaven el projecte de la línia. Més tard va canviar el nom per el de “*Sociedad de Ferrocarriles Económicos del Bajo Llobregat*” que vendria la concessió a la belga “*Chemin de Fer du Nord-est de l'Espagne*”, la qual finalment castellanitzaria el nom degut a les desavinences durant la Primera Guerra Mundial i posaria en funcionament la línia. El mateix grup d'accionistes també va comprar al 1914 bona part de les accions de la TFEMB.

El 4 de juliol de 1919, va crear la “*Compañía General de Ferrocarriles Catalanes*” (CGFC), que es va fer amb el control de les tres línies, comprant la majoria de les accions de tres empreses

propietàries de les concessions. Més tard iniciaren la fusió amb la CC i la NEE, per tal d'acabar dissolent-les, mentre que la TFEMB va continuar existint compartint la titularitat de la línia entre Manresa i Berga amb CGFC i altres accionistes.

Amb les 3 línies sota control, CFGC va procedir a la construcció del tram Martorell - Manresa, per unificar-les, i a la construcció del soterrament fins a Plaça Espanya i fins al Port de Barcelona, però amb l'arribada de la Guerra Civil, i la conseqüent destrucció d'algunes de les infraestructures, un període de decadència s'establiria per sentenciar la companyia.

Des de la fi de la guerra civil i durant gairebé 40 anys, l'empresa arrossegava una precària situació econòmica, va clausurar la línia de Manresa a Guardiola al 1973 i va acabar fent fallida al 1977.

Prèviament, l'Estat va intervenir, i a través de la companyia pública denominada "*Ferrocarriles Españoles de Vía Estrecha*" (FEVE) es va fer càrrec de la línia, anunciant el possible tancament de la línia entre Martorell i Igualada.

També al 1977, les companyies que operaven la línia Barcelona - Vallès, la FSB i la FCC, van anunciar la clausura de la línia, degut als problemes econòmics que arrossegaven des de principis de la dècada. Per tal d'evitar-ho l'Estat també va transferir aquesta línia a FEVE.

Amb la restauració del Parlament de Catalunya, el 5 de setembre de 1979 es va crear l'empresa pública Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya (FGC), la qual va assumir la gestió de totes aquestes línies, transferides des del Govern a la Generalitat. És a partir d'aquest moment que s'inicia una època de millora de la xarxa, renovant diversos trams i millorant el servei.

En l'actualitat FGC, gestiona a més la línia entre Lleida i Pobla de Segur, i altres línies de funiculars, cremalleres, telecabines i pistes d'esquí. A destacar, el Ferrocarril Turístic de l'Alt Llobregat, recuperat de l'antiga línia entre Guardiola de Berguedà i Castellar de n'Hug i que actualment circula entre La Pobla de Lillet i el Clot del Moro, en un recorregut de 3,5 km.

### 2.1.3 Xarxa de Metro de Barcelona

A principis del segle XX, després de la ràpida expansió del sistema de transport ferroviari, es comença a estudiar per primer cop la idea de construir línies de ferrocarril urbanes a la ciutat de Barcelona. Al 1907, es proposa la construcció d'un ferrocarril subterrani que uneixi el port amb la part alta de la ciutat.

L'any 1920 es crea la societat "Ferrocarril Metropolità de Barcelona, S.A.", participada per l'ajuntament de Barcelona i coneguda popularment com "El Transversal", per realitzar el projecte de connexió de les línies de Barcelona a Tarragona i Barcelona a Girona.

Paral·lelament al 1921, es funda la societat "Gran Metropolità de Barcelona, S.A.", integrada per "Tramvies de Barcelona S.A.", "Ferrocarrils de Catalunya S.A." i diversos bancs, la qual es coneixia com "El Gran Metro", per reprendre el projecte inicial de 1907 i començar-ne les obres.

Aquesta línia va ser la primera en ser inaugurada, el 30 de desembre de 1924, discorrent en un primer moment entre les estacions de Lesseps i Catalunya i ampliant-se mig any més tard fins a Liceu, conformant una primera línia de 3,3 km i 6 estacions.

Al setembre de 1926, entrava en servei la segona línia, El Transversal, entre la Bordeta i Catalunya, amb 3,9 km de longitud i 9 estacions. D'aquesta manera quedava conformada la base del metro de Barcelona, amb dues línies perpendiculars a partir de les quals anirien sorgint la resta en successives ampliacions. El Transversal es va ampliar fins a Marina i fins a Bordeta Cotxeres i El Gran Metro va ser ampliat fins a Correus amb un nou ramal des d'Aragó (actual Passeig de Gràcia).

Durant la Guerra Civil Espanyola, el metro servia com a refugi antiaeri i com a magatzem de material bèl·lic, i en aquesta època i durant la postguerra, la xarxa no va ser ampliada.

A partir de 1950 es reprèn l'expansió del metro, ampliant les dues línies existents i creant-ne una de nova denominada línia II, que actualment es correspon amb la línia 5 (blava), que entrava en servei al juliol de 1959. Aquesta línia amb origen a Vilapicina, i 5 estacions, discorria al llarg de 2 km de longitud per acabar enllaçant a l'estació de Sagrera amb el Transversal, el qual hi havia arribat després de diverses ampliacions al gener de 1954.

El 28 de juny de 1961, es produeix la fusió de les dues empreses que operaven la xarxa de metro fins aleshores, i s'adopta un primer canvi de nomenclatura, el Transversal passava a ser la línia I i el Gran Metro II i III.

Al 1967, la línia II va ser ampliada amb 700 metres fins a Horta i l'any següent, al 1968 ho era la línia I de Fabra i Puig fins a Torres i Bages i la III de Liceu fins a Drassanes. Culminant la dècada amb una nova inauguració, el 30 de novembre de 1969, amb la posada en servei de la línia V o Transversal Alt, entre Sant Ramon i Diagonal, amb un total de 7 estacions.



En començar els anys setanta, continua el període d'expansió amb la creació de noves línies i expansió cap a altres termes municipals, diferents de Barcelona, per primer cop.

Al 1970 s'amplia la línia V des de Diagonal fins a Sagrera amb 6 estacions i fusionant les dues línies II i V, per tal de passar-se a anomenar directament línia V.

Una altra gran fita va ser la posada en funcionament de la línia IV, hereva en part de la línia III, amb les seves estacions de Urquinaona i Jaume I i unes altres 4 estacions, al febrer de 1973. Per fer-ho va haver-se de tancar el servei del tram de la línia III entre Aragó i Correus durant el període d'execució de les obres. Finalment, l'estació de Correus va quedar sense servei definitiu en entrar en servei la nova línia, per la seva proximitat amb les estacions adjacents. Només un any més tard, al maig de 1974, la línia s'ampliava per arribar fins a Guinardó.

Al gener de 1975 s'inaugurava una altra línia, la línia denominada III-B entre Zona Universitària i Tarragona amb 7 estacions, que passarien a 9 sis mesos més tard, amb l'entrada en servei del tram fins a Poble Sec.

Per la seva banda, la línia V va ser ampliada al 1976, fins a Sant Ildefons superant els límits municipals fins a Cornellà i Hospitalet de Llobregat. I la línia IV, va ser ampliada novament al 1977, amb un altre tram considerable, de 5 estacions des de Barceloneta fins a Selva de Mar.

A nivell institucional, amb la implantació de la democràcia, la xarxa de metro va ser transferida als òrgans de govern catalans, la Generalitat i l'Ajuntament de Barcelona respectivament, creant Transports Municipals de Barcelona<sup>3</sup>, per a fer-se càrrec de l'operació de la xarxa. Amb aquest pas, s'optà per reorganitzar la nomenclatura de les línies, les quals com ja s'ha vist, havien experimentat forts creixements propiciant noves interconnexions. Així van passar a la nomenclatura que actualment coneixem, la I a L1, la IV a L4 i la V a L5. Cas especial va ser el de les línies III i III-B, les quals contaven amb un transbord obligatori a Poble Sec, que va ser suprimit aquell mateix any, unificant les dues línies i passant-se a anomenar L3.

Després de la reordenació, successives ampliacions es van anar duent a terme, però a menor ritme que en el període anterior, destacant l'arribada fins als municipis de Sant Adrià de Besòs i Badalona de la L4, provinent de la Pau i fins a Pep Ventura a l'abril de 1985. També destacable l'ampliació de la L3 des de Lesseps fins a Montbau, amb 4 noves estacions al mateix any, i les dues ampliacions de la L1 que al 1989, contava amb 6 estacions més per arribar fins a la Feixa Llarga.

No va ser fins al setembre de 1992 que es va inaugurar una nova línia, la L2, que omplia el buit de nomenclatura entre la L1 i la L3, i va unir en un primer moment Sant Antoni amb la Sagrada

---

<sup>3</sup> Al 1984 canviaria la denominació a Transports Metropolitans de Barcelona (TMB), integrant Ferrocarril Metropolità de Barcelona S.A. i Transports de Barcelona S.A.

Família amb un total de 6 estacions, ampliades a fins a 12 al 1997, unint el Paral·lel amb La Pau.

El següent gran pas, va ser al 1996, amb la incorporació al sistema de metro del denominat metro del Vallès, com a tram de la línia entre Barcelona i Sarrià, consistent en l'augment considerable dels serveis entre Catalunya i Reina Elisenda, reduint així la freqüència de pas, per deixar el caràcter de tren interurbà i assimilar-se al sistema de metro. Cal recordar que aquesta línia havia estat transferida a FGC, per part de FEVE, per tant era la primera línia que no estava operada per TMB.

Posteriorment els ramals entre Catalunya i Avinguda Tibidabo i entre Plaça Espanya i Molí Nou – Ciutat Cooperativa, operades també per FGC, s'integrarien de la mateixa manera al sistema de metro, conformant així tres línies més, que actualment són denominades L6, L7 i L8 respectivament<sup>4</sup>. Totes elles, quedarien plenament integrades al 2001, amb la integració tarifaria.

La L3 s'ampliava al setembre de 2001, des de Montbau fins a Canyelles, amb 2,4 km més de línia i 3 noves estacions, i més tard, al 2002, el tram de la L4 comprès entre La Pau i Pep Ventura, passava a formar part de la L2, per tal d'equilibrar el tamany de les línies i facilitar-ne la operativitat.

Al 2003, una nova línia de dimensions inferiors entrava en servei, es tractava de la L11 (la L9 i la L10 estaven en construcció), entre Trinitat Nova i Can Cuiàs, amb una longitud de 2,3 km i un total de 5 noves estacions. Amb aquesta nova obertura, el metro arribava al terme municipal de Montcada i Reixac, tot i que només en un petit tram i de manera testimonial, amb una sola estació.

Amb l'esfondrament del túnel del Carmel (prolongació de la L5) al gener del 2005, es van veure paralitzades totes les ampliacions del metro, també les noves línies 9 i 10, i es va sol·licitar la revisió dels projectes, fins i tot el del túnel de la línia d'Alta Velocitat entre Sants i la Sagrera. Inclòs es crearen plataformes veïnals en contra de la perforació de més túnels a la ciutat.

Tot plegat, va fer que les diverses obres romanguessin paralitzades un temps, fins que finalment es van reprendre al 2007, i un any més tard, al 2008, s'ampliava la L3 des de Canyelles fins a Trinitat Nova.

Amb la finalització de la primera dècada del s.XXI, la innovació tecnològica arriba amb força al metro i al 2009 s'inaugura la L9, la primera línia automàtica de l'estat espanyol, amb 5 estacions, al municipi de Santa Coloma de Gramanet, on ja hi arribava la L1, des de feia uns anys. Posteriorment l'automatització també s'implantava a la L11, inaugurada ja al 2003 i

---

<sup>4</sup> Fins al 2003 es denominaven U6, U7 i S3, respectivament.

també a la L10, oberta al servei a l'abril de 2010 amb 4 estacions, conformant les 3 línies automàtiques del sistema.

En aquest mateix any, les línies 9 i 10 van ser ampliades conjuntament amb un tram comú fins a la l'estació de Sagrera, conformant una gran estació de connexió. També al 2010 s'ampliava la L2 en una estació fins a Badalona - Pompeu Fabra i la L5 posava en servei finalment el tram afectat entre Horta i Vall d'Hebron, amb 3 noves estacions i connectant amb la L3.

El present treball estableix etapes d'estudi fins l'any 2010, per tant aquests són tots els trams i estacions considerats, els quals es recullen en la següent figura, de forma atemporal i el conjunt de trams en funcionament a cada període són consultables a l'Annex 1 del mateix.

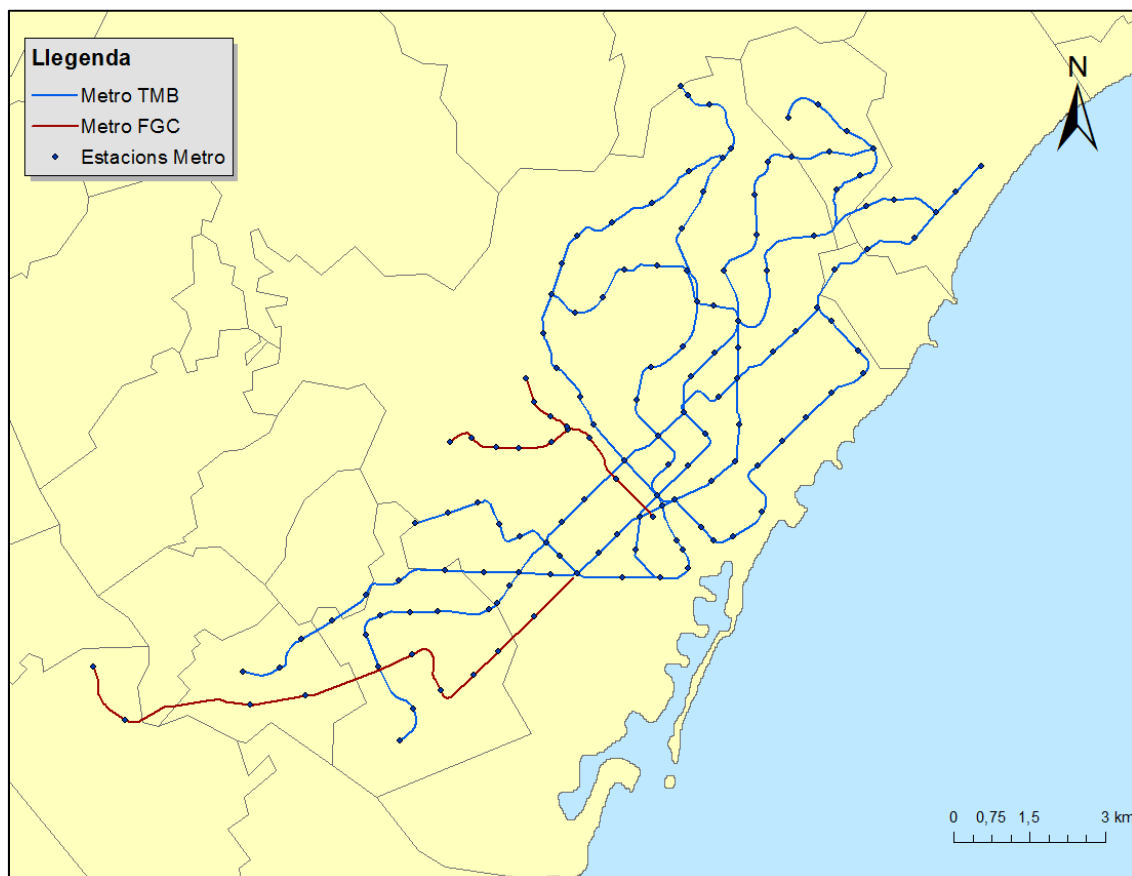


Figura 2.1.5 Configuració de la xarxa de metro de Barcelona al 2010

Font: Elaboració pròpia

Coincidint amb la redacció del present estudi, al febrer de 2016, ha estat posat en servei el tram Sud de la L9, una obra d'enormes dimensions amb gairebé 20 km de longitud i 15 estacions, la ampliació més gran fins a la data de la xarxa de metro. Fins aleshores i des de 2011, no hi havia hagut ampliacions de la xarxa.

En l'actualitat el metro de Barcelona consta de 11 línies, 8 d'elles operades per TMB i 3 per FGC, i dona servei als municipis de Barcelona, Badalona, Cornellà de Llobregat, Esplugues de Llobregat, Hospitalet de Llobregat, Sant Boi de Llobregat, Montcada i Reixach, Sant Adrià de Besòs i Santa Coloma de Gramenet, transportant una mitja diària de més de 1.100.000 viatgers.

Particularment, és una xarxa que té fins a 3 amplex de via diferents: la L1 amb ample ibèric 1668 mm., la L8 amb ample mètric 1000 mm., com tota la línia interurbana de la qual forma part, i la resta de línies amb ample internacional 1435 mm.

En un futur, el tram de la L9 Sud es complementarà amb un nou ramal denominat L10 Sud, cap a la Zona Franca, i aquests dos trams, confluiran en un tram central comú per connectar amb els seus homòlegs Nord a l'estació de Sagrera.

A més, es preveuen un seguit d'ampliacions, dins el Pla Director d'Infraestructures 2011-2020, en els extrems de gairebé totes les línies, i algunes d'elles amb ampliacions considerables, com és el cas de la L3, cap a Sant Feliu de Llobregat, la connexió de la L1 i la L2 cap a l'Aeroport del Prat i l'ampliació de la L1 per l'altre extrem fins a Badalona.

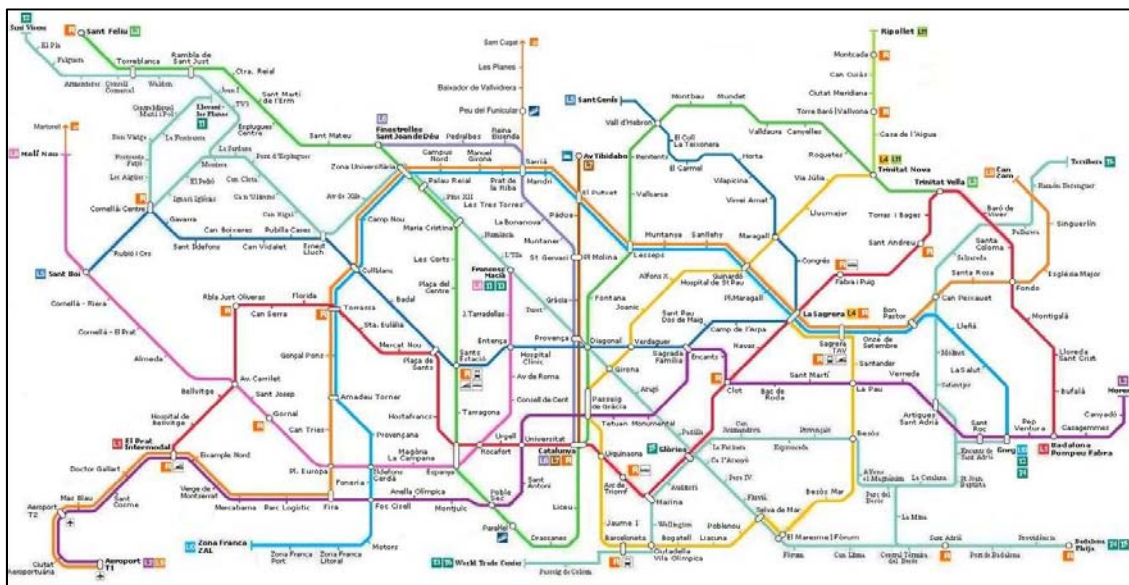


Figura 2.1.6 Configuració futura de la xarxa de metro de Barcelona.

Font: PDI 2011-2020.

---

## 2.2 Modelització de xarxes de transport

Un cop recopilades les dades històriques de la xarxa, es necessita definir una representació gràfica i una metodologia de càlcul que permeti obtenir resultats sobre les característiques que es vulguin analitzar. L'adequada modelització de la xarxa és clau per a l'èxit de qualsevol estudi que es pretengui realitzar.

Tota modelització requereix principalment de tres etapes clarament diferenciades, i complementàries entre elles:

- Modelització del territori, àmbit de l'estudi
- Modelització de les xarxes d'infraestructura a estudiar
- Creació dels algorismes de càlcul relatius als indicadors d'anàlisi triats

Una modelització és una representació o esquema teòric de la realitat que es pretén estudiar, per tant modelitzar és simplificar i classificar la informació. D'una banda simplificar-la perquè es representa la realitat amb elements gràfics, punts, línies i arcs, basats en la teoria de grafs que no poden arribar a contenir tots els detalls existents; de l'altra classificar, perquè a l'hora de tractar la informació, les dades s'agrupen en conjunts de característiques similars en funció dels objectius proposats.

A un constant avenç dels programaris de tractament de dades, que permeten treballar amb una quantitat de dades cada cop més elevada, s'hi contraposa una disponibilitat de dades cada cop més elevada també, alimentada precisament per aquest sistema de tractament de la informació, generant un bucle, que en l'actualitat sembla ser infinit. És per això que cal desgranar la informació per tal de triar aquella que realment sigui necessària i útil per a cada anàlisi, per poder simplificar els procediments de càlcul i extreure resultats clars, fiables i precisos.

Dins d'aquestes consideracions, s'assumeix doncs que dins de qualsevol treball es realitzen simplificacions, amb la finalitat d'aconseguir una metodologia eficaç per als objectius que es persegueixen, i en base als recursos tant tècnics, com econòmics i temporals.

Dels programaris de suport per a aquesta tasca, en destaquen els Sistemes d'Informació Geogràfica (en endavant GIS), sorgits a partir dels programes de Disseny Assistit per Ordenador (CAD<sup>5</sup>). La evolució que presenta el GIS enfront al CAD, és la possibilitat d'atribuir dades a les representacions més enllà de les que es refereixen a la pròpia geometria.

D'aquesta manera als diferents punts i línies que conformen la representació de la xarxa de transport, se li poden assignar dades referents a qualsevol informació que es determini útil de cara a l'anàlisi posterior que se'n pretén realitzar.

---

<sup>5</sup> De l'anglès *Computer Aided Design*

Referent al tipus d'informació, es poden atribuir gran varietat de dades; se'n presenta un petit recull d'aquelles més recurrents per a xarxes de transport, que es poden classificar en diversos tipus:

- Geomètriques: longitud, pendent.
- Operacionals: horaris, freqüències, número de viatgers, velocitat, temps de trajecte.
- Històriques: dates d'obertura i tancament, remodelacions.
- Funcionals: número d'accessos a les estacions, número i sentit de les vies, connexions entre línies, transbords.
- Altres: nomenclatura, operadors, accidents.

A més es combina aquesta informació amb la modelització del territori, que es realitza a partir de polígons, que són la representació de la superfície real georeferenciada, als quals se'ls atribueix dades del tipus, censal, administrativa, d'usos del sòl, etc.

Ahora els programaris GIS, permeten realitzar múltiples càlculs basats en el conjunt d'elements i els seus atributs, prèviament introduïts:

- Localització: reconèixer les característiques d'un element concret.
- Condició: compliment o no de condicions imposades al sistema.
- Tendència: comparació entre situacions temporals o espacials diferents de alguna característica.
- Rutes: càlcul de rutes òptimes entre dos o més punts, en base a condicions imposades.
- Pautes: detecció de pautes espacials.
- Models: generació de models a partir de fenòmens o actuacions simulades.

Com exemple de programes GIS, es troben *ArcGIS*, *QGIS*, *MapInfo*, *MiraMon*, *SigPac* o *Google Earth*.

En el present treball s'ha optat per utilitzar el programari *ArcGIS* 10.3 de *ESRI*, en concret *ArcMap* 10.3 amb totes les eines corresponents a *ArcToolbox*, amb motiu de la seva potència de càlcul i la diversitat de funcions de nivell avançat que inclou.

---

## 3 Dades

En la primera fase de recopilació de dades, aquestes es classifiquen en dos grans grups: territorials i sobre la xarxa ferroviària.

D'una banda territorials en referència als límits administratius i als censos de la població en els diferents períodes. De l'altra, dades sobre la infraestructura a nivell de línies, estacions, anys d'obertura i tancament de les línies, trams, variants i estacions, també informació sobre els diferents enllaços i finalment de tipus operacionals com freqüències, horaris de pas i velocitats comercials.

A continuació es presenten les fonts utilitzades, juntament amb una descripció de les dades i les característiques de la font d'on provenen.

### 3.1 Territori

Les dades sobre el territori han estat de diversa índole: cartografia territorial, límits administratius, censos de població, evolució i creixement de les ciutats, etc.

Referent a la cartografia del territori, s'ha fet servir la base de dades de l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (en endavant, ICGC). Principalment s'ha utilitzat la cartografia georeferenciada sobre l'ETRS89, a escala 1:5000, la qual permet un nivell de detall elevat a l'hora de fer la reconstrucció de la xarxa.

També s'han aprofitat un seguit de mapes històrics que l'ICGC conté en la seva Cartoteca Digital, els quals estan també georeferenciats i posats a disposició a través d'eines com *L'ull del temps, Catalunya abans i ara*<sup>6</sup> i *Com era Catalunya (des de 1945)*<sup>7</sup>, que permeten una comparació entre diferents períodes molt ràpida i alhora de fàcil seguiment, superposant diferents plànols, a voluntat de l'usuari.

En particular han estat molt útils els mapes elaborats a partir del vols fotogramètrics de la sèrie A i la sèrie B, realitzats per el *Army Map Service* de EEUU, als anys 1945-46 i 1956-57 respectivament, a partir d'un acord entre els governs espanyol i americà, que en context de guerra, la Segona Guerra Mundial en el primer cas i la Guerra Freda en el segon, consideraven de vital importància el coneixement exhaustiu del territori, doncs era evident que a nivell estratègic era un factor imprescindible. Tot i ser mapes en blanc i negre i amb una resolució limitada, han permès la identificació de les infraestructures i el seguiment d'aquestes al llarg del seu recorregut.

---

<sup>6</sup> [http://betaserver.icgc.cat/visor/catalunya\\_ull\\_del\\_temps.html](http://betaserver.icgc.cat/visor/catalunya_ull_del_temps.html)

<sup>7</sup> <http://betaportal.icgc.cat/canurb/cathistoric.html>

L'obtenció dels límits administratius, s'ha obtingut també dels arxius descarregables de l'ICGC, tant a nivell autonòmic, provincial, comarcal i municipal. Si bé el problema en aquest cas radica en l'assumpció de que els límits han estat invariables al llarg del període d'estudi. Aquest factor a nivell físic ha hagut d'assumir aquesta limitació, però a nivell poblacional s'ha corregit amb l'elecció d'una font que considerés aquesta limitació.

Així doncs, per obtenir els censos de població en els diferents períodes, aquests han estat consultats del projecte HGISE del departament de Geografia i Sociologia de la Universitat de Lleida, i liderat per Jordi Martí-Henneberg. En particular aquest projecte serà explicat en el següent apartat, però referent a les dades de població, el projecte recull el treball realitzat per Goerlich i Cantarino *Una grid de densidad de población para España*, a través de la fundació BBVA, en el qual es redistribueix la població sobre el territori a partir de mètodes estadístics en base a paràmetres com poden ser els usos del sòl, per tal de prescindir les límits administratius, o si més no per poder realitzar una atribució als límits actuals en base a dades censal passades.

Tot i el gran valor de la font, aquesta recollia les dades de població de forma limitada en el temps, amb dades de l'any 1877 al 2001. Donada la major amplitud del present estudi, s'han hagut de realitzar ajustos, d'una banda a l'hora de treballar indicadors amb dades de població, s'han eliminat els primers períodes corresponents a 1850 i 1870, de l'altra les dades referents a l'últim període, 2010, s'han extret directament de l'Institut d'Estadística de Catalunya, assumint que la definició administrativa pocs canvis ha patit entre 2010 i l'actualitat.

En aquest punt es presenta un gràfic sobre l'evolució de la població a la província de Barcelona en base a les fonts consultades:

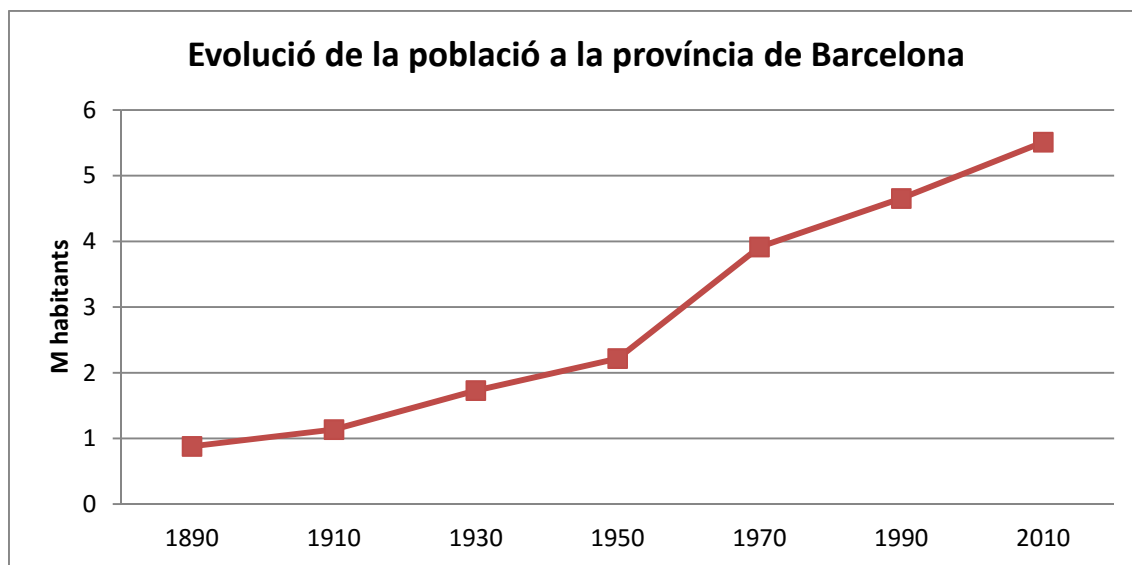


Figura 3.1.1 Evolució de la població a la província de Barcelona en M d'habitants.

Font: Elaboració pròpia a partir d'HGISE.



Finalment per tal de conèixer la superfície ocupada pels nuclis de població, i veure'n l'evolució que aquests han experimentat en base al desenvolupament dels sistemes de transport, on el ferrocarril ha jugat un paper clau, s'ha utilitzat la tasca desenvolupada per Rosa Salas Suades, en la seva tesina *Xarxes de transport col·lectiu i creixement urbà*, en la qual es fa un anàlisi de l'evolució de l'extensió de la trama urbana dels nuclis de la regió metropolitana de Barcelona des de l'any 1848 al 2000, en base al diferents modes de transport col·lectiu.

## 3.2 Xarxa ferroviària

A l'hora d'obtenir les dades de les xarxa ferroviària, en la bibliografia hi ha informació detallada sobre els diferents trams de línia posats en servei, entre les poblacions de partida i arribada, així com les dates en que poden haver deixat d'estar operatius.

El problema principal radica en l'obtenció d'aquestes mateixes dades referents a les estacions de les línies, i també de la informació de tipus operacional, com poden ser horaris de pas, temps de recorregut, freqüències de pas o nombre de viatgers.

Les dades de les estacions de les ciutats més grans, solen estar documentades, principalment aquelles que són terminals, però quan es passa a estacions de localitats més petites, la cosa canvia. Ja sigui perquè hagin estat inaugurades amb posterioritat a la posada en servei de la línia, o perquè hagin caigut en desús i estat d'abandonament, molts cops no se sap amb exactitud els períodes de servei, i inclús diferents referències poden divergir i proporcionar informacions contràries.

Per aquest motiu i com es veurà més endavant, una de les simplificacions adoptades, sol ser passar de calcular indicadors en base a estacions a fer-ho en base a les línies.

En el present treball, per tal de poder establir el grau de variació en els resultats dels mètodes simplificats, cal poder-los calcular amb els mètodes originals, i per tant, és necessària una recopilació de dades referents tant a les línies com a les estacions.

En relació a les dades de les línies, aquestes han estat extretes en gran part del projecte a escala europea, HGISE citat amb anterioritat.

HGISE, Historical GIS of Europe, és una plataforma per a l'anàlisi dels transports, la població i dades socioeconòmiques d'Europa, entre 1850 i 2010. HGISE ha estat desenvolupat per un equip del Departament de Geografia i Sociologia de la Universitat de Lleida liderat per Jordi Martí-Henneberg.

Dins el marc del HGISE, que representa el GIS històric d'Europa, el projecte es centra en:

- Produir les dades cartogràfiques històriques en el format digital GIS (Geographical International System)

- La recopilació de dades de diferents fonts en el format GIS, que ens permet analitzar en profunditat aquestes dades
- Analitzar els diferents tipus de dades utilitzant únicament GIS per a entendre millor la evolució històrica d'Europa, tenint en compte un nombre de fenòmens significatius

Si bé l'escala del projecte a nivell europeu requereix un nivell de detall inferior al del present treball<sup>8</sup>, per tal d'arribar a tot l'àmbit amb la conseqüent pèrdua de precisió, a nivell de dades és un projecte que recull bona part de la informació necessària. Alhora aquest factor servirà de base per veure la diferència de resultats basada en la tria del nivell de detall de cada un dels projectes.

Per altra banda, referent a les estacions, la tasca de recopilar informació sobre aquestes, com ja s'ha intuït al començament del present apartat, ha estat la vessant de recerca més marcada del present estudi.

En aquest sentit, i considerant l'àmbit municipal de Barcelona i municipis adjacents, tot i que el número d'estacions és elevat, hi ha documentació clara i fiable sobre la majoria d'estacions pel fet de la gran quantitat d'estudis i treballs que es centren en aquest entorn. La cosa canvia de forma radical conforme s'abasta un àmbit més ampli i allunyat dels principals pols urbanístics.

Per aquest motiu també, en aquest treball s'ha volgut augmentar l'àmbit d'estudi per tal de servir de base en zones menys explotades a nivell d'investigació.

En aquestes zones amb menys desenvolupament urbà, i encara inferior o inexistent en períodes passats, la dificultat sobre el datat de les estacions augmenta, doncs en molts casos, no es tracta ni d'estacions, sinó de baixadors, amb o inclús sense estructura de vegades fins i tot de caràcter temporal, segons estacionalitat o esdeveniments puntuals.

Per tant aquesta recopilació ha estat duta a terme en base a la bibliografia escrita sobre la temàtica, i citada al capítol de referències bibliogràfiques. Alhora recolzada sobre els diferents estudis ja realitzats com el de Salas (2000), per tal d'agilitzar el procés.

En aquells casos en que la bibliografia no recollia les dades suficients, la recopilació s'ha basat també en la consulta de la cartografia de la època, de retalls de premsa i de galeries d'imatges i fotografies antigues, per aconseguir el màxim de dades possibles. Finalment, en aquells casos en que no ha estat possible obtenir dades amb precisió anual, s'ha intentat establir un rang que permetés discernir amb fiabilitat els canvis produïts entre els períodes de 20 anys en que es divideix l'estudi, d'aquesta manera no afecta als resultats generats.

---

<sup>8</sup> Escala HGISE: 1:50.000 vs escala present treball 1:5.000.

Menció apart mereix el cas d'estudi del metro de Barcelona, on tant la informació sobre línies com la referent a les estacions, abunda i s'ha pogut consultar de les bases de dades de TMB, principal operadora del servei actual de metro a la ciutat.

Per concloure el capítol es presenta un resum en quant a estacions i km de línia ferroviàries que han estat en servei en els diferents períodes:

	Ferrocarril		Metro		Total	
	Estacions	km Línia	Estacions	km Línia	Estacions	km Línia
<b>1850</b>	7	27,6	0	0	7	27,6
<b>1870</b>	73	303,5	0	0	73	303,5
<b>1890</b>	126	509,2	0	0	126	509,2
<b>1910</b>	156	580,2	0	0	156	580,2
<b>1930</b>	199	702,4	16	8,7	215	711,1
<b>1950</b>	204	674,7	21	11,2	225	685,9
<b>1970</b>	203	661,3	43	29,2	246	690,5
<b>1990</b>	188	593,5	88	68,5	276	662,0
<b>2010</b>	196	614,6	116	97,3	312	711,9

Taula 3.2.1 Evolució de la xarxa ferroviària de Barcelona: estacions i longitud de línies.

Font: Elaboració pròpia en base a les dades citades en el capítol 3.

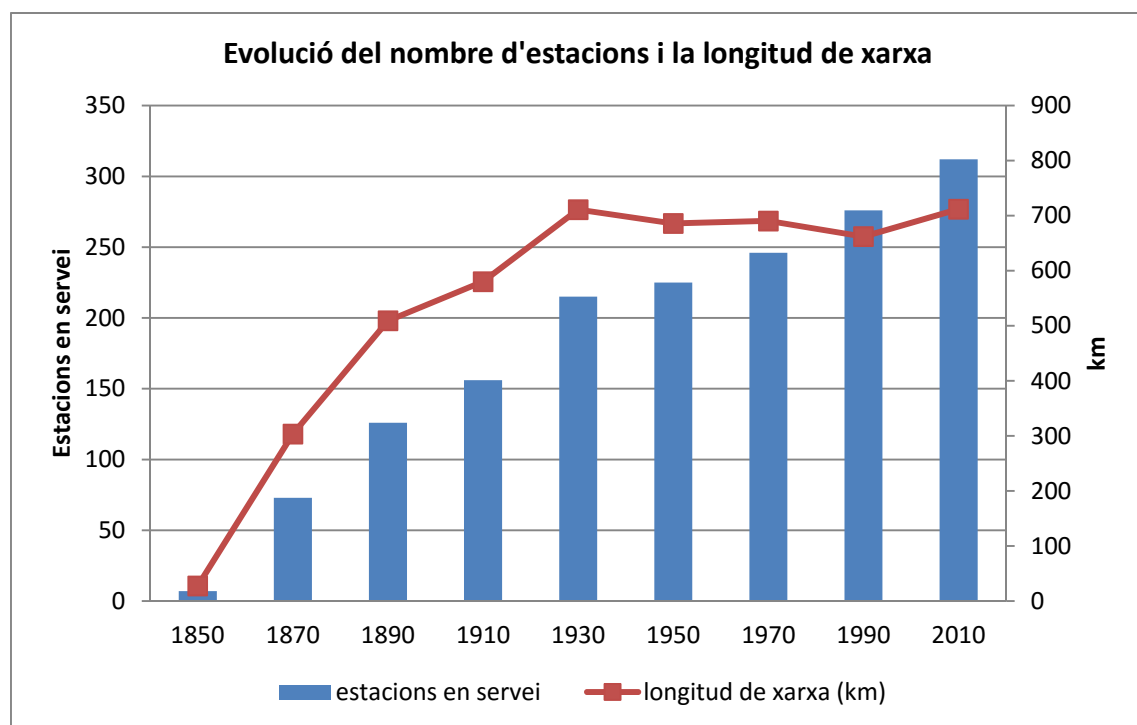


Figura 3.2.1 Evolució de la xarxa ferroviària de Barcelona: estacions i longitud de línies.

Font: Elaboració pròpia en base a les dades citades en el capítol 3.

## 4 Indicadors

En primer lloc cal destacar que a l'hora de realitzar estudis sobre les xarxes de transport es poden diferenciar dues metodologies principals:

- Analitzar diferents àmbits en un determinat moment temporal
- Analitzar el mateix àmbit en diversos moments temporals

Tots dos mètodes poden ser considerats vàlids tenint en compte que cada un servirà per determinar una sèrie de resultats diferents.

Cal tenir present que el període de maduració d'una xarxa de transport qualsevol i la manifestació dels efectes sobre el territori que produeix, té una durada molt llarga, en el que es produeixen variacions, tant en les característiques tecnològiques de la pròpia infraestructura com en l'entorn territorial al que afecten, de manera que l'anàlisi continuat al llarg del temps i els efectes que reflexa són una combinació de tots els canvis patits durant el temps considerats.

Aquests efectes probablement són menys accentuats en el sistema ferroviari, excepte en el cas del salt del ferrocarril convencional a la Alta Velocitat, però en d'altres tipologies de transport com el sistema viari, l'evolució és exponencial.

El segon mètode en canvi permet comparar entre els efectes que les xarxes provoquen en estats de maduració diferents, però en un mateix context temporal i per tant de disponibilitat tecnològica.

El present treball però, més que estudiar la xarxa de transport pròpiament, pretén verificar els instruments utilitzats en estudis d'etapes passades, els quals difereixen dels utilitzats en èpoques més recents. A tals efectes, és necessari optar pel primer mètode enunciat, podent plantejar per a futurs treballs i estudis l'anàlisi transversal per a altres sistemes urbans i poder-los comparar en cadascun dels períodes, ja que com és lògic, amb l'aplicació dels diferents indicadors, de retruc s'obtindran resultats que permetran alhora caracteritzar la xarxa estudiada al llarg del temps.

En segon lloc, l'anàlisi es pot enfocar des dels anomenats indicadors d'oferta, o bé dels indicadors de demanda.

Per entendre la diferència entre ells i la seva utilitat, cal remuntar-se als primers estudis sobre la matèria, on el vehicle privat garantia la satisfacció de tota necessitat de transport. La metodologia aplicada en aquesta fase inicial radicava en models de demanda basats principalment en l'optimització de la velocitat comercial i en la fixació de les càrregues de distribució modal.

Amb el seu desenvolupament es van perfeccionar les metodologies de càlcul de repartiment modal, i es començaven a buscar correlacions amb indicadors econòmics com l'increment del PIB o el número de vehicles per persona.

Els models basats en la satisfacció de la demanda es van prolongar fins que els nivells de saturació de les xarxes van fer que es comencessin a plantejar alternatives d'anàlisi. Així doncs a partir dels anys vuitanta, comença a canviar la filosofia però la metodologia dels estudis segueix basada en els models de distribució modal, desenvolupats en aquest cas amb els més avançats models lògic, aprofitant l'aparició de les eines informàtiques.

A través d'aquests, es buscava l'alteració de les distribucions modals i la alteració de les xarxes de transport, amb l'objectiu d'influir en la decisió dels viatgers a l'hora de triar un mode o altre de transport. No obstant, la lògica operativa seguia sent similar a la preexistent i com a directriu absoluta es segueix prenent la satisfacció de la demanda.

Poc a poc es comença a entendre que l'adequada oferta d'infraestructures és la que condiciona les activitats i que el simple seguiment de la demanda comporta a la congestió i a la reinversió en itineraris saturats.

S'arriba doncs a determinar que algunes característiques del territori i de les xarxes, com per exemple l'accessibilitat, són les que condicionen el desenvolupament, de manera que mitjançant canvis en elles, es generen canvis en els assentaments i en les activitats que s'hi produeixen. Per aquest motiu és necessari endinsar-se en l'estudi de les xarxes mitjançant els models d'oferta.

A continuació es recullen un seguit de variables representatives de cada metodologia:

Variables de demanda:

- Repartiment modal del transport públic
- Número de desplaçaments per habitant en transport públic
- Passatgers-kilòmetre per habitant en transport públic

Variables d'oferta:

- Vehicles-kilòmetre per habitant
- Velocitat mitjana del transport públic
- Kilòmetres d'infraestructura viària, ferroviària...
- Número de places d'aparcament

Paral·lelament a totes dues, trobem les denominades variables de contorn, basades en característiques de tipus social i econòmic:

Variables de contorn:

- Població total

- Densitat de població
- Percentatge de residents al centre i a la corona metropolitana
- Densitat de llocs de treball
- Percentatge de llocs de treball al centre i a la corona metropolitana
- Número de vehicles per habitant

Com a resum, en el present treball, i com bé suggereix el títol, la tècnica utilitzada serà analitzar la xarxa ferroviària de Barcelona en diferents períodes, començant al 1850, poc després de la implantació de la primera línia, i fins a l'actualitat, mitjançant indicadors d'oferta com són la longitud de xarxa, la fractalitat, la cobertura, la densitat, la dotació i l'accessibilitat.

#### 4.1 Longitud de xarxa

La longitud de xarxa com a primer indicador, és un paràmetre conceptualment simple, que estableix la magnitud de la xarxa i alhora serveix de base, sigui de manera global o parcial, per a altres indicadors que el conjuguen amb altres aspectes de tipus funcional i territorial.

Tot estudi parteix d'una representació o modelització, i en funció del grau d'exactitud de la modelització, els resultats es poden veure afectats en major o menor mesura. Ja que el càlcul de la longitud de xarxa es basa en la suma de tots els arcs i rectes de la representació gràfica, el grau d'exactitud d'aquesta és el principal factor a l'hora d'obtenir resultats acurats.

En primer lloc cal esmentar que, per les característiques tècniques de la xarxa ferroviària, on els pendents estan molt limitats, s'acostuma a negligir la variació d'altura en el territori treballant sobre la projecció horitzontal d'aquest.

Seguidament la correcta elecció de l'escala de representació, en funció de les aspiracions i els objectius de cada estudi és el punt crític de partida a valorar. És per aquest motiu que en aquest primer apartat, es vol avaluar la diferència obtinguda entre un projecte a gran escala com és HGISE, que parteix d'una escala 1:50.000, i una reconstrucció pròpia, basada en la cartografia de l'ICGC a escala 1:5.000.

Un altre aspecte important en el càlcul de la longitud de xarxa, són les dades que es recullen de les infraestructures, sovint pels propis propietaris i/o operadors de les infraestructures, que es poden recollir amb criteris diferents.

Per entendre-ho, els darrers criteris estàndard internacionals del transport ferroviari, consideren que la longitud de xarxa a mesurar ha de ser aquella que estigui purament destinada al servei comercial. A tall d'exemple i per veure l'afectació que pot tenir la adopció de criteris diferents, només cal comparar les dades facilitades per TMB, sobre el metro l'any 2012 i darrerament al febrer del present any, coincidint amb la inauguració de la L9 Sud.

Eliminant del comparatiu aquest últim tram, i analitzant les dades de la resta de línies que no van patir modificacions ni ampliacions durant aquest període, com ja s'ha vist en el capítol 2, la longitud de les línies de metro oficial en km són:

	2016	2012	Var. %
<b>L1</b>	20,2	20,7	2,48
<b>L2</b>	12,8	13,1	2,34
<b>L3</b>	17,8	18,4	3,37
<b>L4</b>	16,5	17,3	4,85
<b>L5</b>	18,6	18,9	1,61
<b>L9/10 Nord</b>	10,4	11,1	6,73
<b>L11</b>	2,3	2,3	0
<b>Total</b>	<b>98,6</b>	<b>101,8</b>	<b>3,25</b>

Taula 4.1.1 Revisió del criteri de mesura de la xarxa de metro, adequant-lo a criteris de servei.

Font: Elaboració Pròpia a partir de TMB.

Com bé reflexa el comparatiu, inclús abans de començar l'estudi, els resultats es poden veure alterats en més d'un 3%, només en funció del criteri d'amidament adoptat. Aquesta variació pot semblar més o menys important, però es destaquen màxims de 6,7% en la L9/10 i es preveu que per al sistema de ferrocarril interurbà, amb major longitud de xarxa, i major longitud dels combois, sobretot els de mercaderies, necessitant de cues de maniobra o cotxeres majors les diferències siguin encara majors.

Com a criteri per a l'anàlisi, aquest es pren conforme als criteris estàndards i es mesuraran únicament els trams en servei comercial.

## 4.2 Fractalitat

La teoria fractal és un ramal de l'anàlisi de les xarxes de transport, que es centra en la forma d'aquestes com element central definidor de les característiques de les xarxes.

La teoria fractal té els seus orígens en l'estudi de la formació de cristalls de Von Koch, que mostra com creixen en proporcions desiguals la longitud total de les arestes i la superfície que aquestes cobreixen. La forma més coneguda és la del floc de neu.

Aquesta teoria va ser represa per Mandelbrot<sup>9</sup> en els seus treballs sobre formulació matemàtica de les formes naturals, gràcies al reconeixement de certs patrons en aquestes formes.

Les formes fractals presenten una sèrie de característiques comuns que es recullen a continuació:

- Són massa irregulars per ser descrites amb metodologies geomètriques tradicionals.
- Posseeixen detall a qualsevol escala d'observació.
- Són autosimilars (exacta, aproximada o estadísticament).
- Es defineixen per mitjà d'un algoritme recursiu.

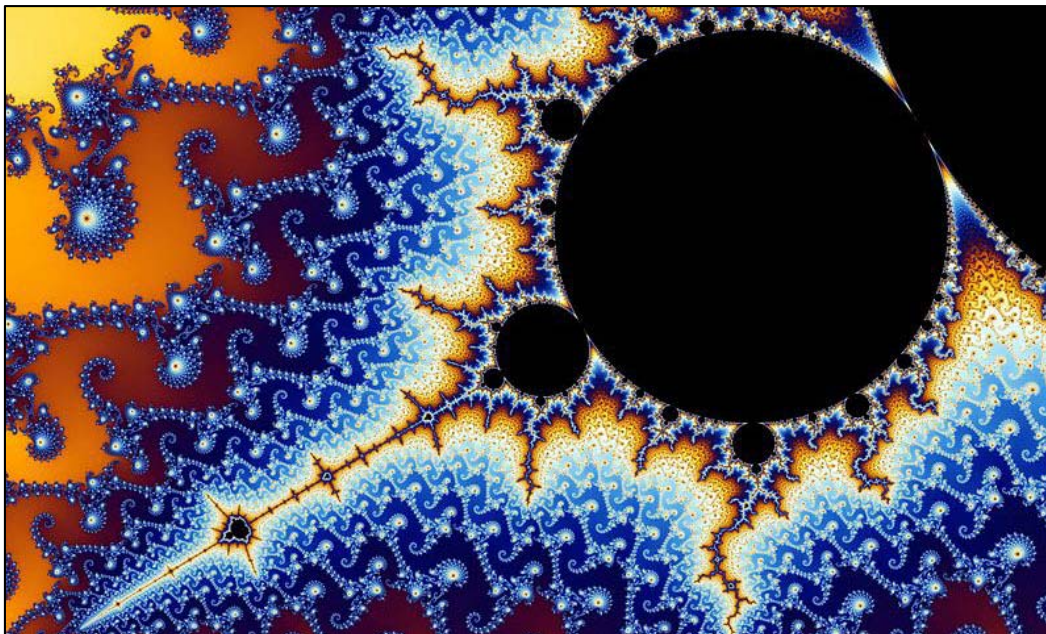


Figura 4.2.1 Representació del conjunt de Mandelbrot, com a exemple de formes fractals.

Font: *Fractal Geometry of Nature*. Mandelbrot (1982).

Un cop definit el concepte de fractalitat, cal preguntar-se sobre la seva aplicació a les xarxes de transport reals i pels resultats de les experiències en aquest camp.

Reprenent el seu origen en les formes naturals, des de les experiències inicials de Mandelbrot, s'ha aconseguit entendre que la natura fa servir configuracions òptimes d'ocupació de l'espai i minimització de l'energia, de manera que aquestes formes poden ser imitades per les xarxes

---

<sup>9</sup> *Fractal Geometry of Nature*. Mandelbrot, B. (1982)



de transport per tal d'aconseguir una cobertura màxima del territori amb els costos mínims, assumint una analogia entre energia i recursos monetaris, tant en fase de construcció com en fase d'exploació.

Així doncs, l'aplicació de la fractalitat en transport, des del punt de vista de la relació existent entre la longitud d'una xarxa i la superfície ocupada per aquesta, consisteix en que mentre les xarxes s'estableixen en una superfície finita, el seu creixement és infinit dins d'aquesta, creant patrons de divisibilitats repetitius, amb la formació de nous ramals a partir dels ja existents, de manera similar a les arrels o les branques dels arbres.



Figura 4.2.2 Identificació de formes fractals en la natura.

L'anàlisi de les formes fractals a la natura, mostren que la seva formació es correspon amb una regla de divisió iterativa, existint una relació constant entre la longitud del sistema i la superfície ocupada, o espai en el cas de sistemes tridimensionals.

El mateix Mandelbrot va aconseguir demostrar que en aquest tipus de formacions es manté constant, en cada pas de la iteració, una relació entre el logaritme de la longitud i el logaritme de la superfície coberta, en qualsevol fragment de l'espai ocupat. Aquesta relació varia el seu valor segons el pas de la iteració al que s'estigui aplicant, mantenint-se entre un mínim de 1 i un màxim de 2.

En aquest sentit, si la teoria de grafs permet analitzar les relacions de proximitat entre els punt de l'espai que produeix una xarxa, una aproximació basada en la teoria fractal pot mesurar la qualitat de connexió espacial. Es per això que moderns estudis d'investigació busquen representar les xarxes urbanes (transport, sanejament, etc.) a partir de figures fractals.

En resum, aquest tipus d'anàlisi permet, entre altres, comparar diferents morfologies de xarxa per tal d'optimitzar la relació entre el cost de construir més xarxa i la qualitat del servei que proporciona, en base al grau d'accessibilitat.

#### 4.2.1 Mètodes de càlcul de l'indicador de fractalitat

Per a l'anàlisi de la fractalitat de les xarxes no interessa la superfície coberta per les estacions sinó la superfície en que aquestes es troben repartides en el territori.

Per determinar la fractalitat cal dividir la superfície d'afectació de la xarxa en sectors, els quals consisteixen en corones circulars de centre invariant, que en l'actual estudi es situarà a la Plaça de Catalunya de Barcelona, i de radi creixent a raó de 1 km a cada ampliació.

Un cop efectuades les operacions prèvies, l'expressió per al càlcul de la fractalitat és:

$$I_F = \frac{\log(n)}{\log(S)} \quad (1)$$

On:

- n: número d'estacions contingudes a cada corona circular
- S: superfície ocupada per la corona circular

Per al càlcul de l'índex de fractalitat global de la xarxa s'aplica la següent expressió:

$$I_F = \frac{\sum_i \frac{\log(n_i)}{\log(S_i)}}{N} \quad (2)$$

On:

- n: número d'estacions contingudes a cada corona circular
- S: superfície ocupada per la corona circular
- N: número de corones circulars

La utilització de logaritmes en la formulació, porta associada una dificultat en el tractaments de les dades, doncs en les corones en que no s'hi ubiqui cap estació, el resultat serà de infinit negatiu, impossibilitant el càlcul del indicador.

La primera alternativa de càlcul a considerar és assumir que  $\log(0) = 0$ . En aquest cas, cal destacar que s'està atribuint la mateixa utilitat tant si es té una estació com cap.

La segona alternativa, consisteix en afegir una estació a cada corona circular, de manera que s'elimina l'error relatiu entre corones citat, però per contra s'augmenta artificialment el índex de fractalitat global de la xarxa.

Els dos mètodes seran calculats, per veure en quina proporció varia l'índex global depenent de l'alternativa escollida i veure quin és el cas que es pot considerar més adient per a la modelització històrica de les xarxes ferroviàries.

Com a simplificació d'aquest indicador i en relació als motius exposats al capítol 3, es proposa el càlcul de la fractalitat en base a la longitud de xarxa, substituint el número d'estacions, restant la següent expressió:

$$I_F = \frac{\log(l)}{\log(S)} \quad (3)$$

On:

- l: km de línia continguts dins de la corona circular
- S: superfície ocupada per la corona circular

Per al càlcul de l'índex global es procedeix de manera anàloga a la ja enunciativa:

$$I_F = \frac{\sum_i \frac{\log(l_i)}{\log(S_i)}}{N} \quad (4)$$

On:

- l: km de línia continguts dins de la corona circular
- S: superfície ocupada per la corona circular
- N: número de corones circulars

És interessant destacar com en aquesta formulació no hi ha excessius problemes a l'hora d'aplicar logaritmes, ja que, la distància mínima amb que les línies poden creuar els límits de les corones circulars és de forma perpendicular, i en haver adoptat un augment de radi igual a 1 km, la  $l_i$  mínima per a la majoria de corones serà 1.

Únicament es presenten alguns problemes en les corones que contenen els extrems de les línies fent que la longitud de la xarxa en aquestes corones no arribi a 1 km, i donant com a resultat un valor negatiu per aquestes corones.

Per evitar aquesta incongruència amb valors negatius, s'aplicarà una analogia als mètodes presentats per al càlcul amb estacions, en aquelles corones que continguin menys d'1 km de línia,  $l_i < 1$ :

- Mètode 1:  $\log(l_i) = 0$
- Mètode 2:  $l_i + 1$

L'elecció d'un o altre es fonamentarà en l'anàlisi dels resultats obtinguts en els càlculs previs en base al número d'estacions.

#### 4.2.2 Particularitats de càlcul de l'indicador de fractalitat

En el cas de Barcelona, i el d'altres regions costaneres, on el mar forma part de la regió metropolitana, per la proximitat del centre d'influència a aquest, es posa en dubte el càlcul de l'índex de fractalitat amb corones circulars completes.

Com és evident, les limitacions geogràfiques de les ciutats situades al litoral condicionen el seu creixement i l'aplicació dels mètodes de càlcul esmentats, poden fer diferir considerablement el resultat d'una regió de costa enfront una interior. Seguint aquest raonament, ciutats com Barcelona, Marsella o Dublín, obtindrien índex de fractalitat molt menors que Madrid, París o Londres, independentment de la consolidació de la xarxa.

Seguint en la línia dels objectius del present treball, es proposa en aquest punt, quantificar l'afectació de considerar la superfície completa de les corones circulars, o bé restar-hi la part corresponent al mar.

Cal parlar atenció que el fet de calcular sobre corones completes, facilita els càlculs fins al punt d'un problema de geometria bàsica, en canvi el cas que ara s'aborda complica aquest càlcul. Alguns autors es limiten a considerar aproximadament la meitat de les corones, com si d'un semicercle es tractés, aplicant factors de reducció entre 0,5 i 0,7, depenent de la distància del centre al mar, i considerant que la línia de costa és recta.

En aquest cas, s'aprofitaran les eines de l'aplicació *ArcToolbox*, per tal d'aconseguir la intersecció exacta entre les corones circulars i la línia de costa delimitada per l'ICGC. A més també s'aplicarà aquesta intersecció al límit provincial que actua de contorn en el present estudi, ja que les línies també han estat truncades en aquest límit.

Així doncs els tres mètodes proposats seran calculats amb corones circulars senceres i amb corones circulars reduïdes.

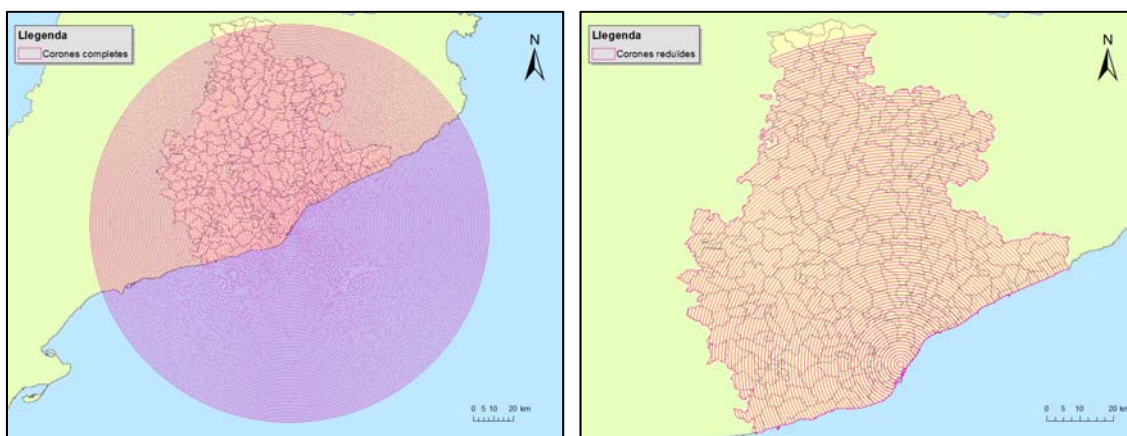


Figura 4.2.3 Representació de corones circulars completes i reduïdes.

Font: Elaboració Pròpia a partir de ICGC.

### 4.3 Cobertura

Un cop presentat l'indicador que representa la morfologia de les xarxes en el territori, el següent pas es veure com la xarxa és capaç de donar servei al territori en el qual es sustenta.

L'indicador de cobertura, acota aquella part del territori que es considera servida eficaçment per una xarxa de transport, en base a les àrees d'influència dels elements d'accés a la xarxa, respecte una àrea total de territori, sigui de tipus administratiu (províncies, comarques, etc.) o operacional (Regió Metropolitana de Barcelona).

Per determinar la cobertura d'una xarxa és necessari doncs establir una distància de referència que limiti la població servida. Aquesta distància s'admet variable en funció del mitjà de transport, ja que per exemple, un potencial usuari està predisposat a recórrer més distància per accedir al metro o al ferrocarril, que per accedir al autobús.

En el cas de la xarxa ferroviàries, es prenen les estacions com elements de captació d'usuaris i s'estableixen unes àrees d'influència circulars, típicament considerades de 1000 metres de radi per al ferrocarril, i 500 metres per al metro. En altres sistemes, com la xarxa d'autobusos, es consideren les respectives parades i la superfície es redueix a 250 metres degut a la diferència d'escala i operacional dels sistemes.

L'expressió típica de l'indicador per a la cobertura d'una estació, es defineix:

$$I_c = \frac{A}{S} \quad (5)$$

On:

- A: àrea d'influència considerada per a l'estació
- S: superfície total de territori en estudi

Per al càlcul de l'indicador per al conjunt de la xarxa, és suficient amb la suma de cobertures de totes les estacions que la conformen:

$$I_c = \frac{\sum_i A_i}{S} \quad (6)$$

On:

- A<sub>i</sub>: àrea d'influència considerada per a cada estació de la xarxa
- S: superfície total de territori en estudi

En alguns estudis, més enllà del caràcter estrictament geomètric que defineix l'indicador, s'estableixen una sèrie de ponderacions en base a paràmetres operacionals de la xarxa per definir millor el nivell de servitud que té cada àrea d'influència.

En aquesta direcció, Wootton i Pick<sup>10</sup> defineixen l'indicador incorporant la freqüència de pas del servei:

$$I_{Ci} = \sum_j \frac{\sqrt{F_{ij}}}{\sqrt{A_i}} \quad (7)$$

On:

- $F_{ij}$ : és la freqüència dels serveis de la línia i que passen per j.
- $A_i$ : àrea d'influència considerada per a l'estació.

I de manera agregada, per al conjunt de la xarxa, l'indicador queda definit segons:

$$I_C = \frac{\sum_i \left( \sum_j \frac{\sqrt{F_{ij}}}{\sqrt{A_i}} \right) \cdot A_i}{S} \quad (8)$$

Amb aquesta formulació s'aconsegueix representar el grau d'atracció o utilitat de cadascuna de les àrees d'influència, ja que el servei posseeix major qualitat com més gran és la freqüència de pas, i per conseqüent l'índex de cobertura és proporcional a la freqüència, ja que majors freqüències resulten en una satisfacció més elevada de les necessitats de transport per part dels usuaris.

En modelització històrica, i com és el cas del present estudi, aquesta segona formulació s'acostuma a deixar de banda degut a la manca de dades de tipus operacionals, doncs per dur-la a terme es necessiten els serveis dels trens amb les parades a totes les estacions, que quan es tracta de les estacions principals, és possible recopilar, però quan es passa a tractar les estacions mitjanes i petites o baixadors, es torna inviable.

Per aquest motiu, en endavant es reprendrà la formulació primitiva, considerant les característiques físiques de la xarxa i deixant de banda la vessant operacional, fent que totes les àrees d'influència obtinguin la mateixa importància respecte el conjunt global de la xarxa.

#### 4.3.1 Mètodes de càlcul de l'indicador de cobertura

Per a l'adaptació del càlcul de l'indicador de cobertura, les diferències radicaràn bàsicament en el mètode com s'obtenen les diferents àrees d'influència de les línies, deixant constant l'àrea total de territori, considerat en aquest cas el límit provincial de Barcelona.

---

<sup>10</sup> Wootton, H.J.; Pick, G.W. (1.967): *A Model for trips generated by households*.

El primer mètode utilitzat i considerat en el present treball com a mètode més exacte, serà calcular la superfície servida a partir de buffers al voltant de les estacions, considerant una àrea d'influència de 1000 metres de radi per al ferrocarril i 500 metres per al metro.

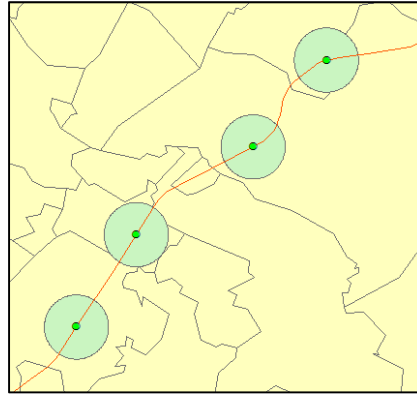


Figura 4.3.1 Detall de càlcul de la cobertura amb *buffers* a les estacions

La primera simplificació consisteix en deixar de banda les estacions i treballar amb la longitud de xarxa, com s'ha fet anteriorment en l'indicador de fractalitat. En aquest segon mètode doncs, es conserven les distàncies de les àrees d'influència però ara calculades al llarg de tota la longitud de via de la xarxa.

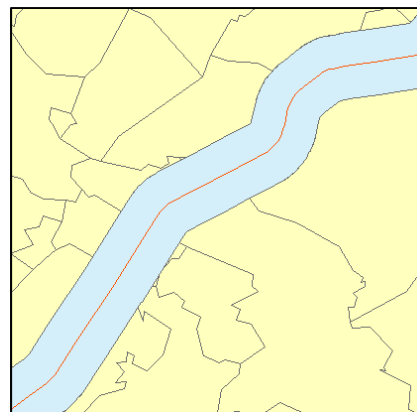


Figura 4.3.2 Detall de càlcul de la cobertura amb *buffers* a les línies

Una segona simplificació, neix de la intenció de simplificar els càlculs, i obtenir de forma geomètrica l'àrea coberta, com un rectangle de 2 km de costat que conté la línia en el seu interior, sense tenir en compte els solapaments entre línies. Aquesta simplificació permet prescindir de programari informàtic, i alhora redueix el temps de dedicació i les dades necessàries, doncs l'únic paràmetre que intervé és la longitud total de xarxa.

Finalment, en una tercera simplificació s'eliminen tota classe de paràmetres geomètrics i s'estableix la cobertura com una variable dicotòmica en base a algun dels límits administratius inferiors al límit global de la xarxa, per exemple, en el cas català i en particular de Barcelona que centra l'estudi, considerant com a límit global el límit provincial, les àrees administratives inferiors possibles serien regions, vegueries, comarques, municipis, districtes, etc.

Aquesta metodologia estableix que si una línia discorre per un límit administratiu, la superfície d'aquest es considera coberta en la seva totalitat per la xarxa de transport. En aquest cas les úniques dades necessàries són les superfícies de les subdivisions i un plànol que permeti conèixer de forma no necessàriament massa precisa el recorregut de les línies.

Com és fàcil preveure, quant més petita sigui la subdivisió triada menys error es cometrà respecte el mètode inicial, però alhora requerirà de major quantitat de dades i d'esforç temporal per anar determinant la cobertura, mentre que límits majors assumeixen més error però en simplifiquen la tasca.

Una subdivisió recurrent, sol ser la divisió municipal, degut a l'existència de gran quantitat d'informació, així com dels censos de població que després són utilitzats en agregació a altres indicadors.

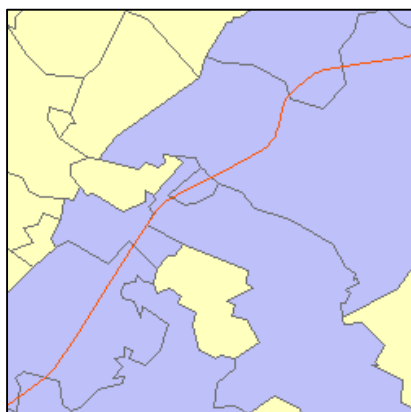


Figura 4.3.3 Detall de càlcul de la cobertura com a variable dicotòmica en base als límits municipals

#### 4.4 Densitat i Dotació

Densitat i dotació són indicadors que continuen englobats dins el tipus d'indicadors de cobertura, que mesuren el grau de connexitat que una xarxa dóna al territori on està implantada. Entenent la connexitat com un indicador topològic que permet caracteritzar les relacions que es produeixen entre els subsistemes d'una xarxa territorial.

En aquest sentit la densitat es defineix com a la relació existent entre la longitud de xarxa i la superfície del territori al que serveix, expressada en  $\text{km} / \text{km}^2$ .



Per la seva banda la dotació es defineix com la relació existent entre la longitud de xarxa i la població coberta, expressada en km / habitants.

Per la diferència d'ordre de magnitud existent entre els paràmetres, s'ajusten les relacions de la següent manera:

- Densitat: km / 10<sup>3</sup> km<sup>2</sup>
- Dotació: km / 10<sup>6</sup> habitants

Ambdós indicadors utilitzen la longitud de xarxa i la normalitzen amb d'altres indicadors, per tant els resultats dependran dels mètodes de càlcul adoptats en els indicadors primaris.

Es per això que en aquest apartat no es presenten diferents mètodes de càlcul, ja que sortiran a partir de la combinació dels anteriors, sinó que el què es pretén és veure com interactuen les variacions amb la combinació de diferents indicadors.

Per aquests indicadors doncs, només es pretén fer-ne un anàlisi, a nivell descriptiu, de la seva evolució.

## 4.5 Accessibilitat

L'accessibilitat és un dels indicadors més importants per estudiar la comunicació que realitza la xarxa entre les diferents parts del territori, i a tals efectes, és un dels més emprats en els estudis de modelització de xarxes de transport.

Aquest indicador ha estat definit en múltiples ocasions, degut a l'interès que desperta, però en tots els casos es segueix un patró comú: l'accessibilitat mesura l'esforç, valorat en forma de temps o cost, que suposa per a un usuari desplaçar-se des d'un punt, origen, a un altre, destí, a través de la xarxa de transport.

De manera agrupada, es defineix com el temps mitjà que costa desplaçar-se des d'un punt, origen fins a la resta de destins, a través del camí mínim.

L'expressió de càlcul per a l'indicador d'accessibilitat es defineix segons Subero (2009):

$$I_{A_{ij}} = \frac{\sum_{i=1, \dots, m} \left[ t_{a_i} + (t_e + t_v + (\sum_{k=1, \dots, s} \{t_t + t_e + t_v\}_k)_{ij}) + t_{s_j} \right]}{N} \quad (9)$$

On:

- t<sub>a</sub>: temps d'accés des d'un node del territori a la xarxa
- t<sub>e</sub>: temps d'espera fins a l'arribada del mode de transport
- t<sub>v</sub>: temps de viatge en el mode

- $t_i$ : temps de transbordament entre dos modes de transport en el mateix viatge
- $t_s$ : temps de sortida des de la xarxa fins al node del territori de destí
- $k$ : nombre de modes de transport necessaris per al viatge
- $n \times m$ : nombre de nodes que conformen el sistema
- $N$ : nombre total de parades a considerar

L'indicador d'accessibilitat de la xarxa es defineix com la suma dels diferents indicadors d'accessibilitat en cada un dels punts d'estudi, ponderats per la seva àrea d'influència o cobertura, dividit per l'àrea total de cobertura de la xarxa.

$$I_A = \frac{\sum_{i=1, \dots, m} \left[ I_{A_{ij}} \times A_i \right]}{\sum_{i=1, \dots, m} A_i} \quad (10)$$

On:

- $A$ : àrea de cobertura de cada estació

La definició presa conté gran quantitat de paràmetres temporals, associats a la pròpia gestió de la xarxa, que depèn de variables operacionals de la xarxa, freqüències de pas, velocitat comercial, etc. i a més una component relacionada amb la població i el territori. Es procedeix a analitzar-ne alguns termes de la formulació per veure la complexitat que requereix:

- $t_a$ : el temps d'accés a l'estació ha de contenir en temps mig d'accés des de tots els punts de l'àrea d'influència fins a l'estació o boca de metro. Considerant la densitat de població, la distribució de la trama urbana, i una velocitat mitja per tal de calcular el temps final d'accés.
- $t_e$ : el temps d'espera a l'estació depèn bàsicament de la freqüència de pas dels combois. Ara bé, aquesta és variable al llarg del dia, i també amb variabilitat segons dies feiners o festius i fins i tot amb caràcter estacional.
- $t_v$ : el temps de viatge, es considera el temps físic de viatge dins el comboi, el qual és variable d'un viatge a un altre, donat que no sempre es realitzen les mateixes parades, o que s'ha de tenir en compte la interacció amb d'altres trens circulant per la mateixa línia.
- $t_t$ : el temps de transbord dependrà en gran mesura de les característiques de l'intercanviador, i dels processos necessaris per portar a terme el canvi modal.
- $t_s$ : el temps de sortida és un element simètric al temps d'accés que conté les mateixes variables de càlcul.
- $A$ : respecte l'àrea d'influència, aquest és un aspecte que s'aborda des del punt de vista de l'indicador de cobertura, amb les metodologies exposades anteriorment.

Alhora està pensada per a la potència de càlcul del programari modern, ja que la dificultat creix exponencialment en relació al grau de complexitat de la xarxa, i suposant la disponibilitat de tots els anteriors paràmetres.

Si bé la disponibilitat d'eines de càlcul està resolta actualment i per tant representa un problema menor, més enllà del temps necessari per introduir la enorme quantitat de paràmetres, en modelització històrica, la disponibilitat d'aquest tipus de dades és escassa i per tant representa el major *handicap*, requerint de manera ineludible simplificacions de l'indicador.

#### 4.5.1 Metodologia de càlcul per a l'indicador d'accessibilitat

Partint de la metodologia descrita on es tenen en compte tots els aspectes que influeixen dins del desenvolupament d'una acció de transport, el mètode de simplificació adoptat consisteix en la simplificació independent dels termes que componen la formulació, mantenint el concepte base de suma de temps parcials.

Així doncs, cada element és simplificat en major o menor mesura, assumint la variació del temps total de viatge.

##### Temps d'accés:

Per al càlcul del temps d'accés, com a primera reducció es considera que la població està repartida homogèniament dins de l'àrea d'influència i es determina el centre de gravetat d'aquesta, per tal de definir una distància entre el centre de gravetat i l'estació, a la qual se li aplica una velocitat mitjana de desplaçament a peu, típicament de 4 km/h.

Donat la variació que pateixen els assentaments urbans al llarg del temps, provocats en part per la pròpia xarxa de transport, el centre de gravetat és variable a cada període, variant la distància amb l'estació i el per consegüent el temps d'accés.

A tals efectes, es requereix l'estudi de l'evolució de les ciutats, en la línia de Salas (2000), on es recull el desenvolupament de la trama urbana per a diversos períodes. Donat que aquest tipus d'estudis és escàs en la línia històrica i sovint centrat en les ciutats més importants, es pren com a referència un centre constant, coincident amb el centre del casc antic de les diverses poblacions.

Ahora el temps destinat a accedir a l'andana des del moment en que l'usuari arriba a l'estació, s'acostuma a valorar de forma constant, o bé es negligeix.

##### Temps d'espera:

Per tal de simplificar aquest paràmetre, un primer mètode força recurrent és en càlcul en base a la meitat de l'invers de l'interval de pas mig de cada línia.

Donat que depenent del tamany de la xarxa a estudiar, la quantitat de línies pot elevar-se bastant, un altre mètode és considerar un temps d'espera mig igual per a cada mètode de transport. Així per exemple Subero (2009) en els seus estudis, considera:

- $t_e$  metro = 5 minuts
- $t_e$  ferrocarril = 15 minuts

En modelització històrica intervenen altres factors, ja que el servei prestat per les línies antigament dista molt de l'actual. Sovint algunes línies tenien únicament un o dos serveis diaris per a viatgers, inclús algunes línies podien no tenir-ne cada dia, això fa que l'usuari canviï la forma d'actuar i ja preveu el seu viatge en base als serveis oferts pel sistema, reduint el temps d'espera al mínim considerat subjectivament l'hora de sortida cap a l'estació.

Ahora en les línies amb serveis més constants, sovint no es disposen de tots els horaris en els diferents períodes, o si més no només es conserven aquells de les estacions amb més activitat, donant lloc a una informació heterogènia que de ser considerada, pot induir igualment variacions en el resultat real.

Aquests motius porten a que una alternativa sigui negligir aquest paràmetre.

#### Temps de viatge:

Una manera d'obtenir aquest paràmetre és a partir de les taules d'horaris de pas en les diferents estacions. Ara bé això requereix considerar tots els horaris de les diferents estacions, per tal de treure el temps mig d'un trajecte, des d'una estació fins a totes les altres i repetir el procés per a totes les estacions.

Considerant que una xarxa de transport desenvolupada, pot contenir de l'ordre de 500 estacions en la seva regió metropolitana, el càlcul esdevé molt costós i encara més la recopilació i introducció de les dades dels horaris.

Una estratègia utilitzada és basar els càlculs al comportament real que efectua un tren en el seu trajecte on existeixen varies fases, que es van repetint a cada tram comprés entre dues estacions:

- Acceleració
- Circulació a velocitat nominal
- Desacceleració
- Parada a l'estació

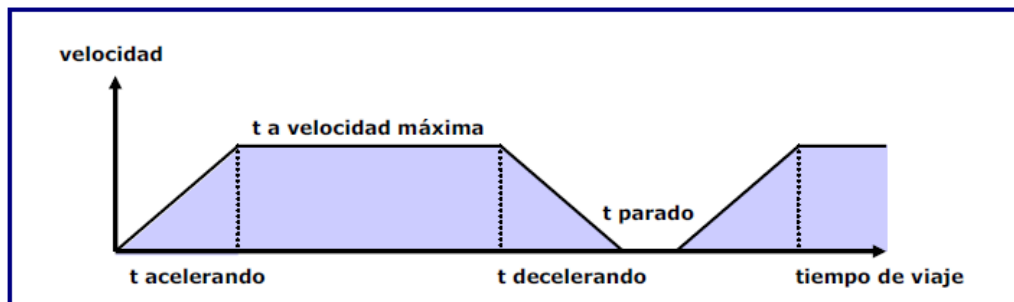


Figura 4.5.1 Cicle de temps de viatge.

Font: Subero (2009).

Per tal de calcular-les, en primer lloc cal disposar de la distància entre les estacions on es realitzen parades i en segon lloc es prenen una sèrie de valors constants en quant a temps de parada, velocitat i acceleració i desacceleració. Aquests valors seran diferents segons els mètode de transport que es calculi, metro, ferrocarril o Alta Velocitat. Així per exemple, Subero (2009) en els seus estudis, considera:

- Acceleració i desacceleració:  $1\text{m/s}^2$
- Velocitat màxima metro: 45 km/h
- Velocitat màxima ferrocarril de rodalies: 75 km/h
- Temps de parada metro: 20 segons
- Temps de parada ferrocarril: 30 segons

En segona instància una simplificació considerada és calcular el temps de viatge en base a la velocitat comercial del sistema, de manera que amb la distància entre estacions i una velocitat mitjana per a tota la xarxa, el procediment queda bastant simplificat.

En aquesta direcció i considerant la variació de la velocitat al llarg del temps, en modelització històrica es prenen uns valors de referència a cada període, de la velocitat comercial que alguns autor han intentat definir en els seus estudis.

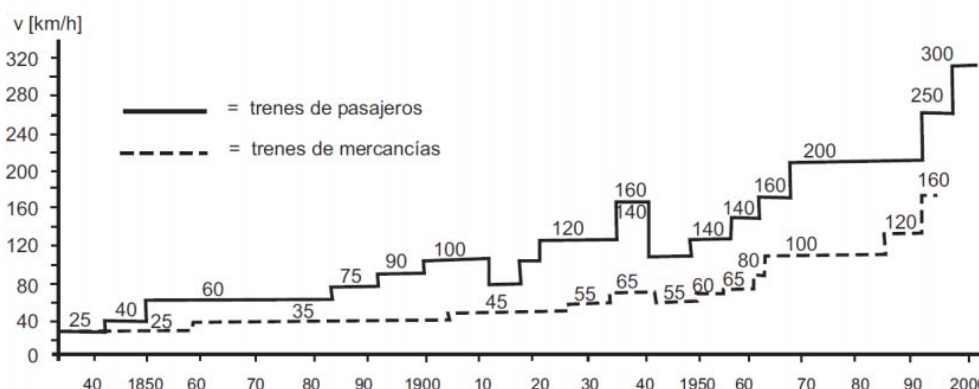


Figura 4.5.2 Evolució històrica de la velocitat màxima i la càrrega per eix dels trens de passatgers i de mercaderies.

Font: Lichtberger, B. (2011). *Manual de vía. Eurailpress, DVV Media Group.*

#### Temps de transbord:

El temps de transbord, depèn bàsicament de les característiques de l'intercanviador, en base a les dimensions i els elements de connexió que contingui (longitud de passadissos, escales, ascensors, controls,...), per la qual cosa és extremadament difícil valorar una mesura física d'aquest.

Ahora es correspon amb el temps definit entre l'arribada a l'estació i l'accés a l'andana, amb l'única peculiaritat que aquest acostuma a tenir una percepció negativa per part de l'usuari.

En aquest sentit o bé es pren un valor constant o esglaonat en base al tamany dels intercanviadors, és a dir classificar-los i atorgar un temps constant a cada categoria, o bé es negligeix.

#### Temps de sortida:

Com ja s'ha vist és invers al temps d'accés i per tant el càlcul i les simplificacions són anàlogues.

D'aquesta manera, la definició analítica de l'indicador queda de la següent manera:

$$I_{A_{ij}} = \frac{\sum_{i=1, \dots, m} \sum_{j=1, \dots, n} \left[ t_{a_i} + \left( t_v + \left( \sum_{k=1, \dots, s} \{t_v\}_k \right)_{ij} \right) + t_{s_j} \right]}{N} \quad (11)$$

Ahora, donat que s'aproximen els temps per:

$$t_i = \frac{d}{v_i} \quad (12)$$

$$I_{A_{ij}} = \frac{\sum_{i=1, \dots, m} \sum_{j=1, \dots, n} \left[ \frac{d_{a_i}}{v_a} + \left( \frac{d_{ik}}{v_{ik}} + \left( \sum_{k=1, \dots, s} \left\{ \frac{d_{kj}}{v_{kj}} \right\}_k \right)_{ij} \right) + \frac{d_{s_j}}{v_s} \right]}{N} \quad (13)$$

I considerant una velocitat constant per a tot el sistema de ferrocarril, "v" pot sortir factor comú i el sumatori de distàncies es correspon a la distància total entre l'origen "i" i el destí "j" pel camí mínim. A més, les velocitats d'accés i sortida es corresponen a una velocitat mitja a peu considerada generalment de l'ordre de 4 km/h, de manera que es poden agrupar el temps d'accés i de sortida. Quedant la formulació simplificada com segueix:

$$I_{A_{ij}} = \frac{\sum_{i=1, \dots, m} \sum_{j=1, \dots, n} \left[ \frac{d_{a_i} + d_{s_j}}{v_p} + \frac{d_{ij}}{v_{fc}} \right]}{N} \quad (14)$$

On:

- $d_a$ : distància entre el centre de la població i l'estació, en l'origen.
- $d_s$ : distància entre el centre de la població i l'estació, en el destí.
- $d_{ij}$ : distància entre l'estació "i" i l'estació "j".
- $v_p$ : velocitat a peu de l'usuari.
- $v_{fc}$ : velocitats mitja global de la xarxa de ferrocarril.
- $N$ : nombre total de parades a considerar.

Aquesta serà la simplificació de càlcul a considerar, mentre que per al càlcul de la forma més complexa, s'explotaran altres eines de càlcul que es descriuen al capítol 5.

## 5 Anàlisi i Resultats

En aquest cinquè capítol es fa el recull de resultats del l'anàlisi de la xarxa realitzat segons les metodologies exposades al capítol 4 i en base a les dades, procediments i *softwares* de modelització explicats en els capítols 2 i 3.

Tret que s'indiqui el contrari, en endavant el recull de taules, gràfics i plànols de xarxa presentats són d'elaboració pròpia, obtinguts del procés d'anàlisi.

També indicar que tots els plànols resum de cada un dels períodes i per a cada indicador són consultables en l'Annex 2 del document i s'ordenen d'acord a l'estructura del capítol actual.

### 5.1 Longitud de xarxa

En una primera aproximació de la xarxa global, sense tenir en compte les dates de posada en servei i tancament de les diferents línies, s'han obtingut les següents longituds totals de xarxa:

<b>Reconstrucció</b>	767,5 km
<b>HGISE</b>	652,2 km
<b>Variació</b>	15,02 %

Taula 5.1.1 Longitud de xarxa

En aquest cas només es considera la xarxa de ferrocarril, deixant de banda el metro ja que el projecte HGISE no en conté les dades.





Figura 5.1.1 Longitud de xarxa segons HGISE i Reconstrucció pròpia a escala 1:5.000 en base a l'ICGC

Un cop considerats els períodes de servei de cadascuna de les línies, amb les seves respectives variants i modificacions al llarg de la història, les longituds de xarxa operatives a cada període es recullen a continuació:

	1850	1870	1890	1910	1930	1950	1970	1990	2010
<b>Reconstrucció</b>	27,6	303,5	509,2	580,2	702,4	674,7	661,3	593,5	614,6
<b>HGISE</b>	25,9	279,7	458,5	507,0	630,3	622,2	606,0	547,9	565,1
<b>Variació %</b>	6,18	7,83	9,94	12,62	10,26	7,77	8,36	7,68	8,05

Taula 5.1.2 Longitud de xarxa a cada període en km i variació HGISE vs Reconstrucció pròpia.

El mateixos resultats, presentats de forma gràfica, permeten una visualització més clara de les variacions obtingudes:

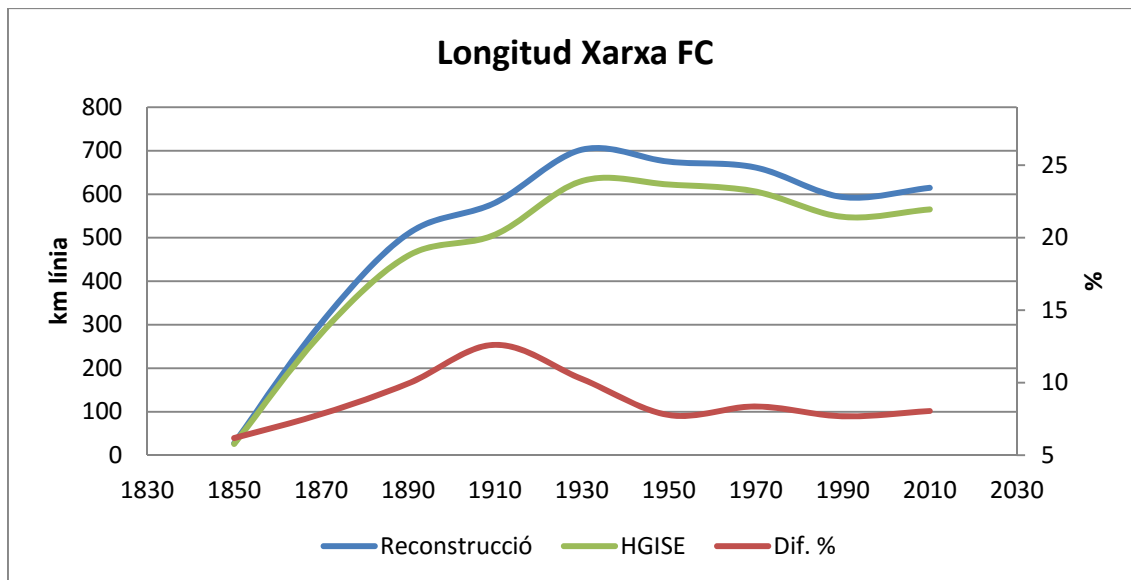


Figura 5.1.2 Evolució de la longitud de la xarxa ferroviària.

S'observa com en les primeres dècades, la diferència creix alhora que ho van fent les línies mentre que a partir dels anys 50 s'estabilitza entorn al 8%.

Aquest comportament dual, només pot ser explicat per la intervenció de més d'un factor diferenciador i, analitzant l'evolució dels grafs obtinguts, es pot veure com principalment són dos els motius que produeixen les diferències obtingudes.

En primer lloc, un dels motius és que es passen per alt antigues variants dels traçats actuals, , també antigues connexions entre línies, i fins i tot algunes línies senceres que actualment han estat desmantellades, com és el cas de la línia de Mollet del Vallès a Caldes de Montbui.

Aquest factor afecta bàsicament en els períodes compresos entre 1850 i 1930, degut al desconeixement de la xarxa històrica, sigui per manca d'informació o bé per recursos limitats a l'hora de fer la reconstrucció, portant a adoptar la simplificació que els traçats actuals han estat invariants al llarg del temps.

En segon lloc, el factor que intervé és la precisió de la reconstrucció, doncs les diferències a l'hora de perfilar els traçats són poc importants a petita escala, però acumulen una variació important en el còmput global de la xarxa.

Aquest factor és present en tot moment i en conseqüència és l'únic que afecta en els períodes més recents, la qual cosa permet quantificar en una diferència del 8% el fet de treballar amb una escala 1:50.000 o fer-ho a 1:5.000.

Si bé és cert, que segons la tipologia de la xarxa i les característiques tècniques del traçat, aquesta diferència pot variar. En traçats de línies d'alta velocitat, amb grans extensions territorials per cobrir, l'escala haurà de ser necessàriament més gran, però els radis de curvatura elevats i les distàncies rectes, disminuiran l'afectació sobre la precisió. En canvi per a ferrocarrils regionals i metro, on les àrees metropolitanes on actuen no es poden comparar amb l'àmbit de l'alta velocitat, l'escala a escollir haurà de disminuir per tal d'aconseguir un nivell de detall òptim i que les dues tipologies de xarxa tinguin la mateixa qualitat un cop modelitzades.

## 5.2 Fractalitat

Per al càlcul de l'indicador de fractalitat, en el capítol anterior s'han establert dos mètodes en base al número d'estacions, consistents en dues variants per al càlcul dels logaritmes i una posterior simplificació, basada en la longitud de xarxa.

També s'han definit superfícies de càlcul segons corones circulars completes i corones circulars reduïdes, per ser Barcelona una regió costanera, intersecades amb el límit provincial com a contorn del present estudi. En aquest anàlisi també es calcularà l'afectació en funció d'aquestes dues superfícies.

### 5.2.1 Fractalitat en base al número d'estacions

Resultats per a corones circulars completes:

Mètode 1:  $\log(0) = 0$

	1850	1870	1890	1910	1930	1950	1970	1990	2010
$I_F$	0	0,0738	0,1021	0,1120	0,1505	0,1594	0,1707	0,2038	0,2151

Taula 5.2.1 Resultats per a l'indicador de fractalitat, considerant número d'estacions i  $\log(0) = 0$ , amb corones completes.

Mètode 2: afegint una estació a cada corona ( $n+1$ )

	1850	1870	1890	1910	1930	1950	1970	1990	2010
$I_F$	0,0431	0,1533	0,1780	0,1714	0,2096	0,2163	0,2256	0,2598	0,2717

Taula 5.2.2 Resultats per a l'indicador de fractalitat, considerant número d'estacions i  $n+1$  estacions, amb corones completes.

### Resultats per a corones circulars reduïdes:

Mètode 1:  $\log(0) = 0$

	1850	1870	1890	1910	1930	1950	1970	1990	2010
$I_F$	0	0,0817	0,1172	0,1280	0,1722	0,1821	0,1930	0,2282	0,2408

Taula 5.2.3 Resultats per a l'indicador de fractalitat, considerant número d'estacions i  $\log(0) = 0$ , amb corones reduïdes.

Mètode 2: afegint una estació a cada corona

	1850	1870	1890	1910	1930	1950	1970	1990	2010
$I_F$	0,0483	0,1734	0,2068	0,2018	0,2467	0,2541	0,2625	0,2957	0,3092

Taula 5.2.4 Resultats per a l'indicador de fractalitat, considerant número d'estacions i  $n+1$  estacions, amb corones reduïdes.

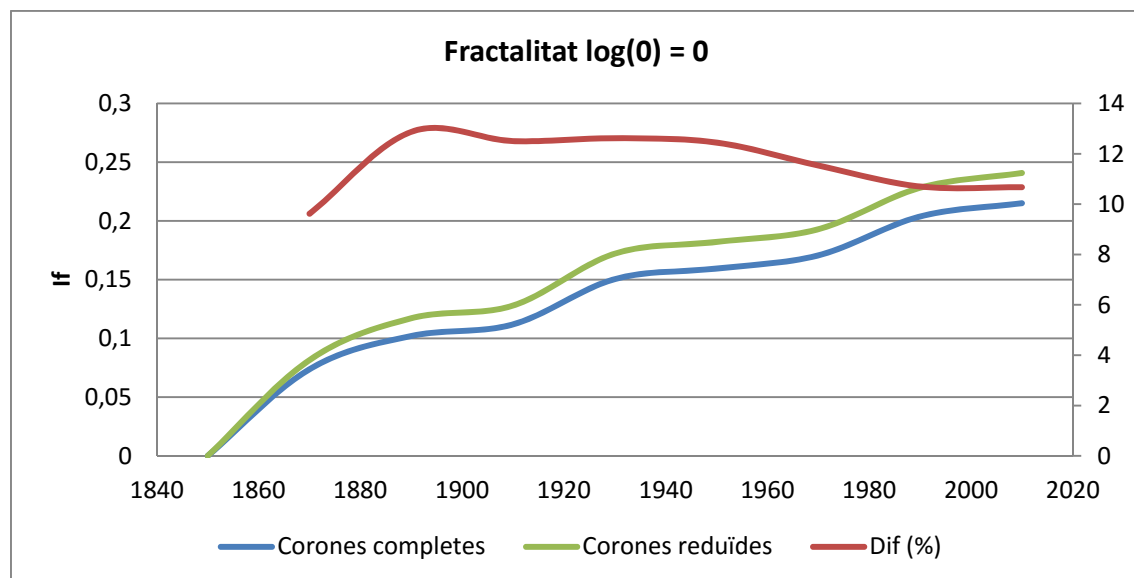


Figura 5.2.1 Evolució de l'indicador de fractalitat, considerant número d'estacions i  $\log(0) = 0$ .

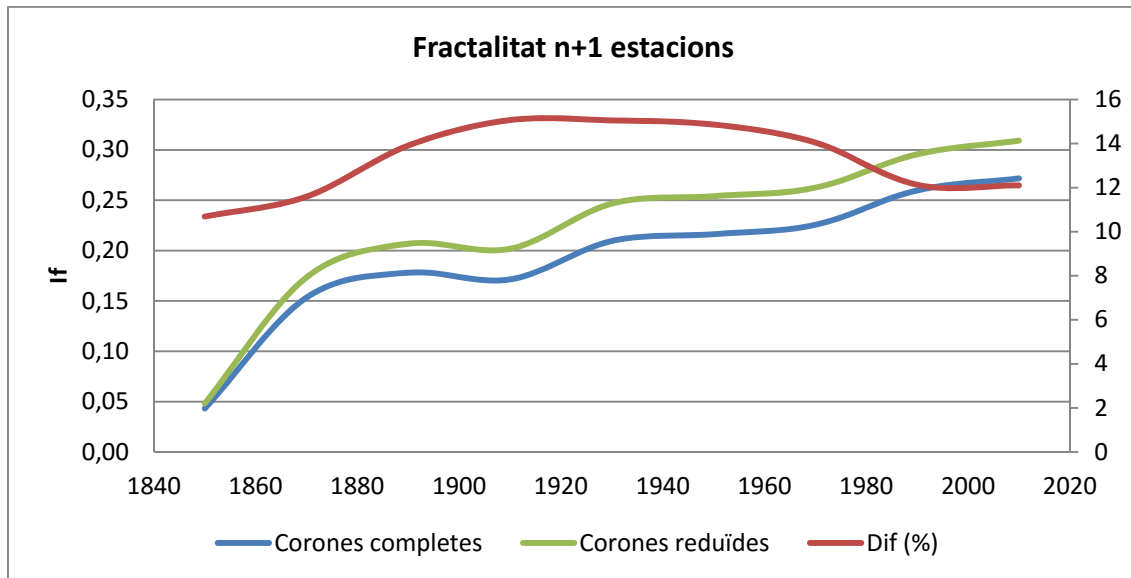


Figura 5.2.2 Evolució de l'indicador de fractalitat, considerant número d'estacions i n+1 estacions.

Un cop obtinguts els resultats, es procedeix a analitzar en primer lloc l'afectació pel fet de triar corones circulars completes o reduïdes.

Tant en el primer com en el segon mètode de càlcul, la diferència provinent de la superfície adoptada, es situa entre un 10 i un 15% de variació de l'indicador. Tenint en compte que el factor de reducció en el període amb més extensió de xarxa, és de 0,25, es mostra com l'acció dels logaritmes amorteix la diferència, en valor absolut.

1930	
Corones completes	30.790 km <sup>2</sup>
Corones reduïdes	7.565 km <sup>2</sup>
Factor reductor	0,25

Taula 5.2.5 Comparació de les superfícies possibles per al càlcul de la fractalitat.

Ara bé, si es compara amb l'evolució pròpia de l'indicador de fractalitat, aquest es veu reduït al nivell d'entre 15 i 30 anys endarrere. Per tant en termes relatius a la comparació de l'evolució de ciutats amb geografies diferents, la decisió cobra molta importància si no es vol incórrer en l'error de penalitzar les ciutats que tenen el creixement limitat per barreres naturals.

Un cop analitzat aquest aspecte, cal analitzar la variació entre els mètodes derivats de l'operativitat amb logaritmes, per fer-ho i en endavant, es consideraran les corones circulars reduïdes.

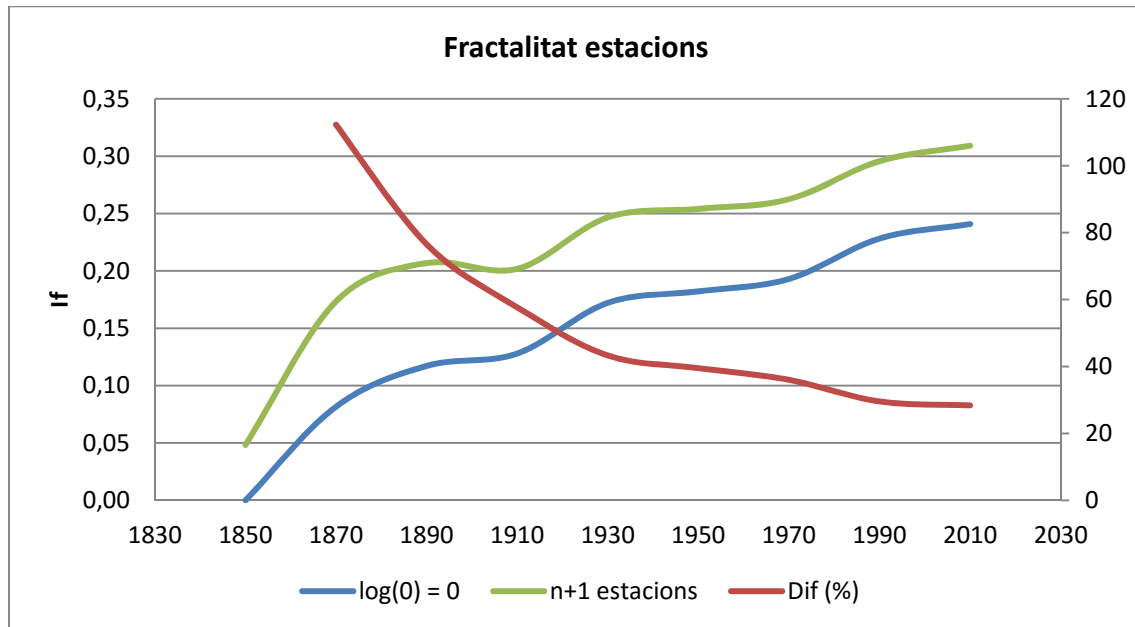


Figura 5.2.3 Evolució de l'indicador de fractalitat considerant número d'estacions, amb corones reduïdes.

En aquest cas es constata el sobredimensionament global de l'indicador en el cas de sumar una estació a cada sector, incorrent en un error més alt quan menys estacions conté la xarxa, és a dir quan més enrere en el temps, més error es comet al estar la xarxa en fases primàries de desenvolupament.

Si s'analiza la quantitat de corones en les quals ha calgut un ajust dels logaritmes, es comprova com, en xarxes més desenvolupades i per tant més denses, el percentatge de corones ajustades disminueix.

	1850	1870	1890	1910	1930	1950	1970	1990	2010
<b>Corones amb 0 estacions</b>	21	21	18	30	24	24	24	19	18
<b>% Total Corones</b>	75,0	31,3	22,5	30,9	24,2	24,2	24,7	22,9	21,7
<b>Primera corona sense estació</b>	1	14	14	14	21	21	21	53	54

Taula 5.2.6 Anàlisi de les corones amb 0 estacions.

Una evidència encara més clara és que analitzant les taules parcials de resultats, es comprova com en el darrer període (2010), corresponent a la màxima maduració de la xarxa estudiada, aquest fet no és produeix fins a la corona número 54 (a 54 km de distància del centre considerat), molt més lluny de l'abast de la majoria de nuclis fortament urbanitzats de la Regió Metropolitana de Barcelona.

Si es considera que amb el primer mètode es modifica el valor només en aquelles corones que necessiten ajust, i amb el segon es modifica el valor global de l'indicador, es pot arribar a la conclusió que l'elecció d'un o altre dependrà de l'anàlisi que es pretengui realitzar i de la tipologia de xarxa sobre la qual s'apliqui.

Com a particularitat, però, en aquells estudis que contemplin la comparativa entre xarxes de diferents ciutats, en les mateixes fases temporals, en la línia de la descripció en el capítol 4, l'error es veuria compensat si en totes elles es fa servir el mateix mètode.

### 5.2.2 Fractalitat en base a la longitud de xarxa

Tenint en compte els resultats parcials ja obtinguts en aquest apartat, s'ha calculat la fractalitat aplicant la simplificació en funció de la longitud de la xarxa.

D'una banda s'han utilitzat les corones reduïdes, i de l'altra per analogia amb el primer mètode:

$$\log(0) = 0 \rightarrow \text{Si } l_i < 1, \log(l_i) = 0$$

En aquest cas s'ha escollit el primer mètode perquè com ja s'ha comentat en el capítol 4, les corones que necessitaran ajust calculant en base a la longitud de xarxa, seran molt poques, per tant es busca que l'indicador global es mantingui el menys alterat possible.

	1850	1870	1890	1910	1930	1950	1970	1990	2010
$I_F$	0,0136	0,3483	0,4047	0,3799	0,4250	0,4208	0,4262	0,4514	0,4650

Taula 5.2.7 Evolució de l'indicador de fractalitat, considerant longitud de línies.

És en aquest punt quan es pot analitzar la variació produïda per la simplificació introduïda:

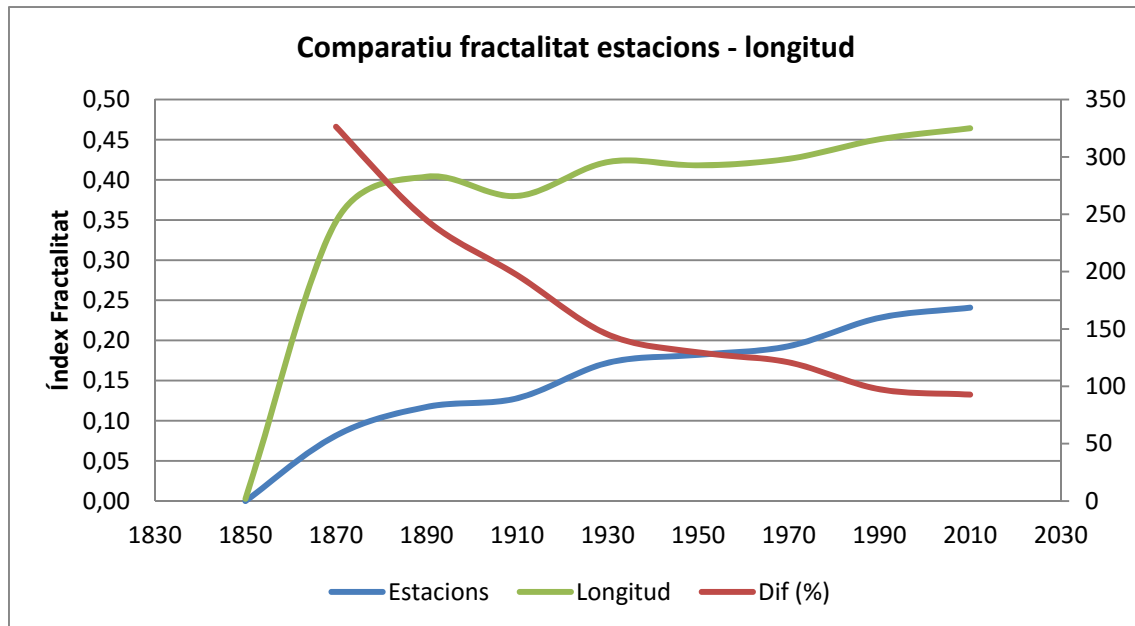


Figura 5.2.4 Comparatiu indicador fractalitat.

La simplificació adoptada, indueix un error d'entre el 100 i el 300%, o el que és equivalent a sobredimensionar el valor calculat segons les estacions, en 4 cops en fases inicials i en el doble en fases més recents.

Un dels principals aspectes és que, calculat en base a la longitud de xarxa, l'indicador creix ràpidament al principi amb l'expansió de les línies pel territori, i la variació posterior és més escassa, mentre que en el cas anterior, calculat amb les estacions, el creixement és més sostingut, amb la construcció d'estacions sobre les línies ja existents.

Amb aquest comportament es constata que, per estats de més maduració de la infraestructura la diferència tendria a reduir-se.

Per comprovar aquesta hipòtesi, s'ha decidit reorientar l'estudi i limitar el càlcul de la fractalitat a les primeres 10 i les primeres 25 corones, corresponents en l'actualitat a un àmbit plenament urbà i un àmbit metropolità respectivament, per veure la validesa de la simplificació en àmbits on la xarxa ferroviària està fortament consolidada.

Els resultats obtinguts es presenten resumits a continuació:



Per a àmbit metropolità:

25 km	1850	1870	1890	1910	1930	1950	1970	1990	2010
If Estacions	0	0,18	0,22	0,27	0,41	0,45	0,50	0,57	0,62
If Línies	0,02	0,47	0,56	0,58	0,70	0,70	0,74	0,78	0,82
Dif (%)	-	160,5	156,8	109,2	70,41	57,11	47,66	37,15	32,86

Taula 5.2.8 Comparació de mètodes de càlcul de l'indicador de fractalitat en àmbit metropolità.

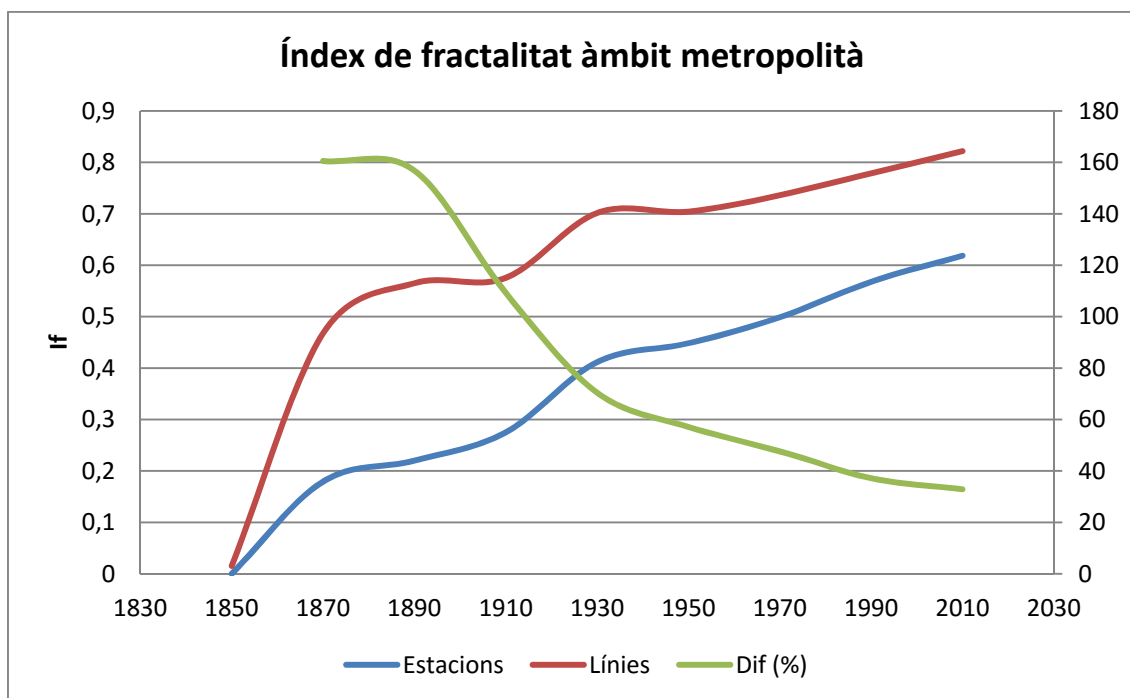


Figura 5.2.5 Comparació de mètodes de càlcul de l'indicador de fractalitat en àmbit metropolità.

En aquest àmbit la diferència obtinguda es situa per sota del mínim del càlcul anterior a partir del quart període, arribant a variacions de poc més del 30 %. Es conserva igualment la diferència de creixements en els primers períodes.

Per a àmbit urbà:

10 km	1850	1870	1890	1910	1930	1950	1970	1990	2010
If Estacions	0	0,33	0,34	0,48	0,69	0,74	0,84	0,99	1,07
If Línies	0,03	0,56	0,63	0,65	0,84	0,87	0,95	1,05	1,12
Dif (%)	-	69,63	85,10	37,52	22,17	17,55	13,90	5,87	3,93

Taula 5.2.9 Comparació de mètodes de càlcul de l'indicador de fractalitat en àmbit urbà.

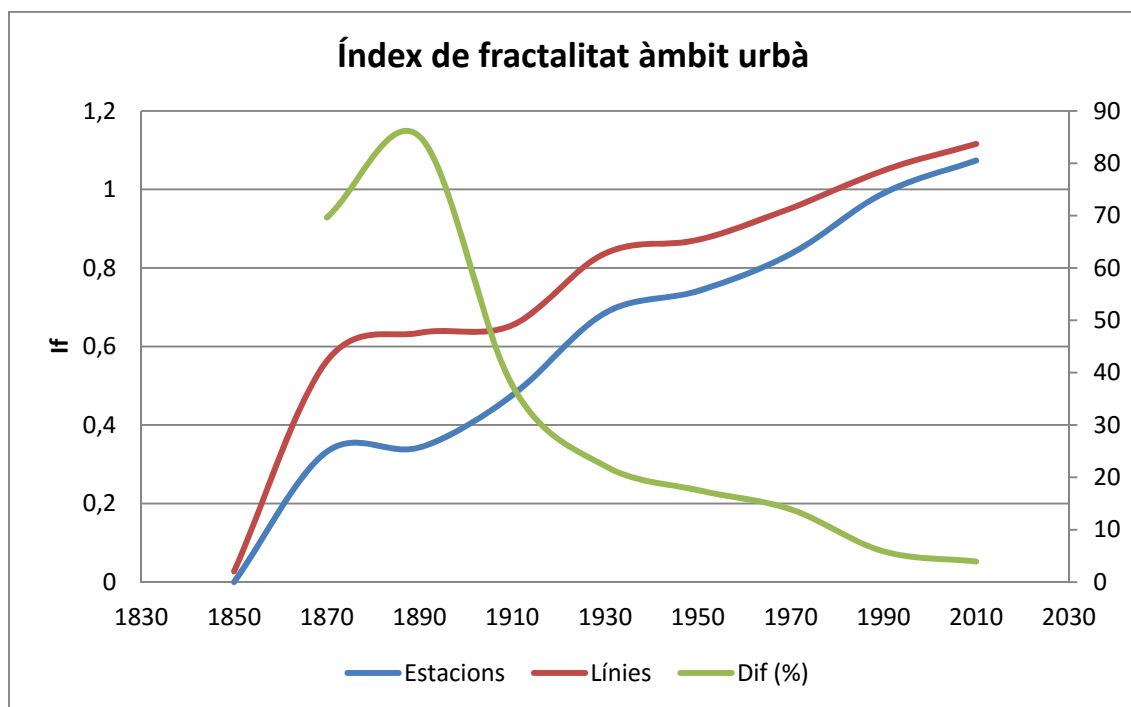


Figura 5.2.6 Comparació de mètodes de càlcul de l'indicador de fractalitat en àmbit urbà.

En aquest segon àmbit, des del segon període la variació es situa en tot moment per sota del mínim del càlcul amb l'àmbit complet, arribant a mínims del 4 %, i estant acotat per sota del 30 % a partir del quart període, coincidint amb les primeres reordenacions de les línies a la ciutat de Barcelona.

Com es comprova, la variació de la simplificació respecte la definició primitiva de l'indicador, en aquest tipus d'àmbit, és molt menor. Per tant és summament important, considerar aquest aspecte a l'hora de triar si es pot considerar tolerable la utilització de la simplificació o no.

## 5.3 Cobertura

En el càlcul de la cobertura, els resultats han estat calculats en termes absoluts i posteriorment, relatius a la superfície total de la província de Barcelona.

Superfície	
Barcelona	7.725 km <sup>2</sup>

Taula 5.3.1 Càlcul de la superfície del límit provincial de Barcelona

### 5.3.1 Estacions amb àrees d'influència

Per aquest primer mètode, es considera que l'àrea coberta respon a superfícies circulars al voltant de cada estació de la xarxa, considerant un radi de 1000 metres per al ferrocarril i de 500 metres per a la xarxa de metro.

L'esquema de cobertura global de la xarxa queda definit segons el plànol següent:

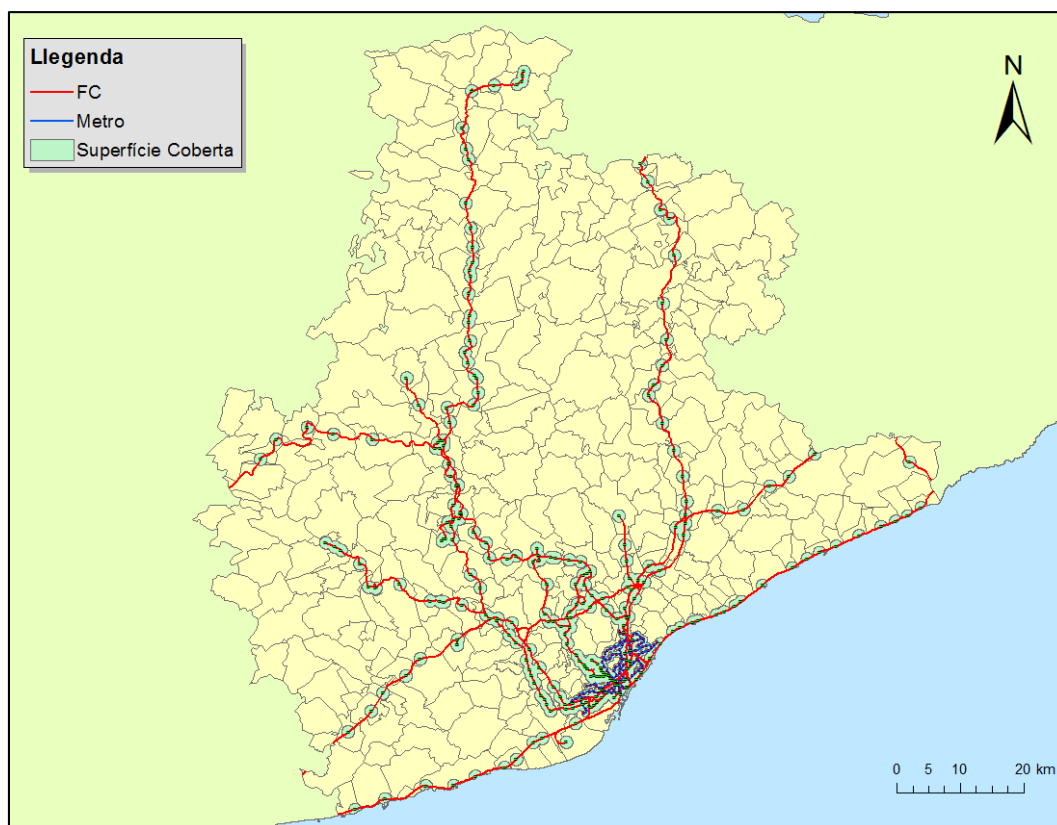


Figura 5.3.1 Plànol de superfície total coberta a partir d'àrees d'influència de les estacions.

Els resultats per a la cobertura considerant els períodes de servei de cada estació, han estat els següents:

	1850	1870	1890	1910	1930	1950	1970	1990	2010
<b>km<sup>2</sup></b>	13,1	181,0	325,6	392,0	483,8	490,3	481,9	432,3	444,2
<b>%</b>	0,17	2,34	4,22	5,07	6,26	6,35	6,24	5,60	5,75

Taula 5.3.2 Resultats de cobertura del ferrocarril en base a les àrees d'influència de les estacions.

Si s'inclou la xarxa de metro de Barcelona, els resultats de superfície coberta són els següents:

	1850	1870	1890	1910	1930	1950	1970	1990	2010
<b>km<sup>2</sup></b>	13,1	181,0	325,6	392,0	484,2	490,8	486,6	454,2	475,1
<b>%</b>	0,17	2,34	4,22	5,07	6,27	6,35	6,30	5,88	6,15

Taula 5.3.3 Resultats de cobertura del conjunt ferrocarril i metro en base a les àrees d'influència de les estacions.

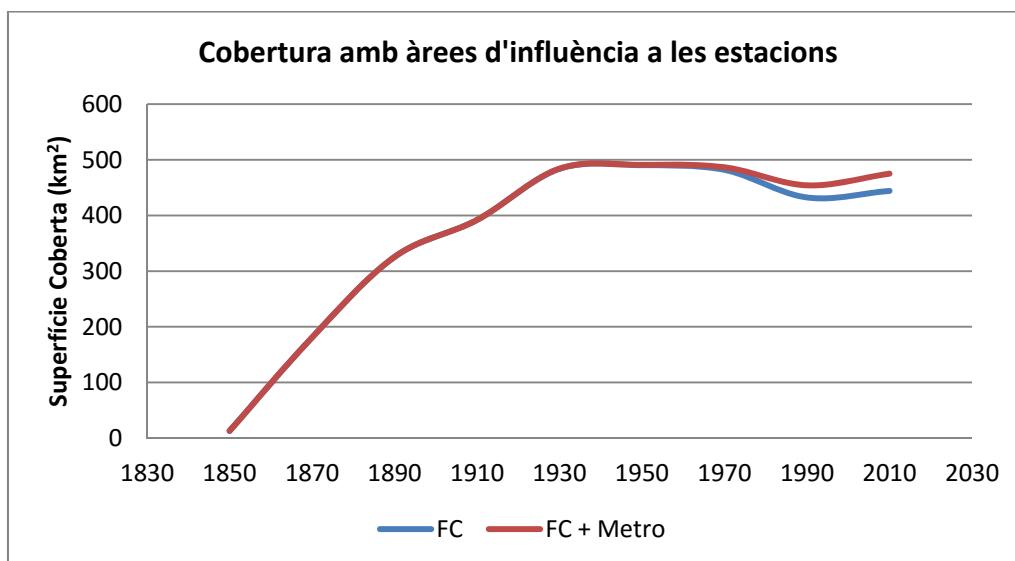


Figura 5.3.2 Evolució de la cobertura en base a les àrees d'influència de les estacions.

És necessari analitzar en aquest punt quin és el grau de contribució del metro al sistema global, calculant les diferències entre els resultats anteriors:

	1850	1870	1890	1910	1930	1950	1970	1990	2010
<b>km<sup>2</sup></b>	-	-	-	-	0,38	0,54	4,68	21,87	30,94
<b>% BCN</b>	-	-	-	-	0,005	0,007	0,061	0,283	0,400
<b>% cobert</b>	-	-	-	-	0,078	0,110	0,962	4,15	6,511

Taula 5.3.4 Cobertura aportada pel metro a la xarxa global.

Referent al conjunt del territori, incorporar la xarxa de metro al càlcul incrementa ben poc la superfície coberta, doncs bona part de la superfície que cobreix ja es considerava coberta per la xarxa de ferrocarril convencional. Ara bé, en relació a la superfície coberta, aquesta es veu ampliada en fins a un 6,5 %, per tant de no incloure'l ja s'estaria incorrent en un error considerable.

El sistema de metro doncs, podria ser negligit en fases inicials del seu desenvolupament, però en l'actualitat, amb una xarxa consolidada i en expansió, juga un paper significant i per tant és necessari incloure'l als càlculs.

Tot seguit es calculen les diverses simplificacions enunciades en el capítol anterior, per posteriorment realitzar-ne la comparació i l'anàlisi objectiu de manera conjunta.

### 5.3.2 Línies amb àrees d'influència calculades amb GIS

Per aquest segon mètode, es considera que l'àrea coberta respon a superfícies esteses perpendicularment a les línies de la xarxa, considerant una distància de 1000 metres per al ferrocarril i de 500 metres per a la xarxa de metro, per analogia amb el mètode anterior.

L'esquema de cobertura global de la xarxa queda definit segons el plànol següent:

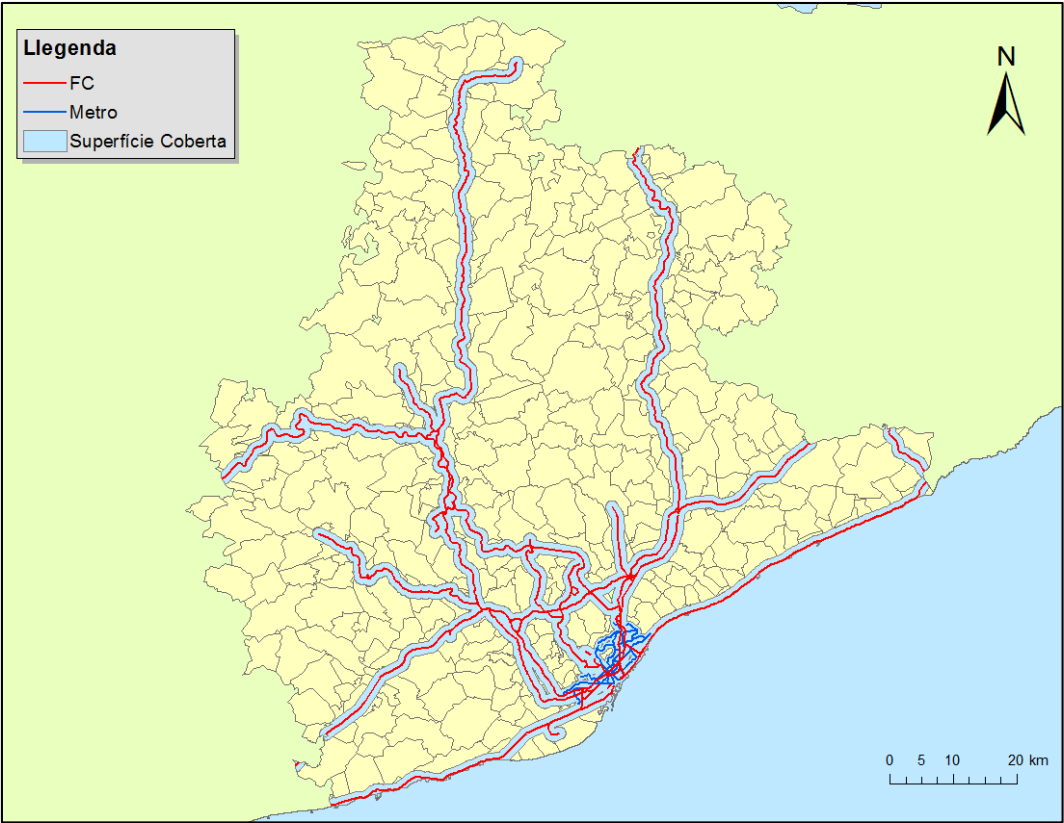


Figura 5.3.3 Plànol de superfície total coberta a partir d'àrees d'influència a les línies.

	1850	1870	1890	1910	1930	1950	1970	1990	2010
km <sup>2</sup>	33,7	530,3	868,4	1000,0	1172,6	1126,0	1105,3	986,9	1011,3
%	0,44	6,87	11,24	12,95	15,18	14,58	14,31	12,78	13,09

Taula 5.3.5 Resultats de cobertura del conjunt ferrocarril i metro en base a les àrees d'influència de les línies.

5.3.3 Línies amb àrees d'influència geomètriques

Per aquest tercer mètode, es considera que l'àrea coberta respon a superfícies constants esteses a banda i banda de la via, sense tenir en compte solapaments, cosa que permet una simplificació considerable tant de dades com de càlcul.

En aquest cas no es necessari un plànol de xarxa global, ja que el càlcul respon únicament a càlculs geomètrics.

	1850	1870	1890	1910	1930	1950	1970	1990	2010
<b>km</b>	27,6	303,5	509,2	580,2	711,1	685,9	690,5	662,0	711,9
<b>km<sup>2</sup></b>	55,2	606,9	1018,3	1160,3	1422,2	1371,7	1380,9	1324,0	1423,8
<b>%</b>	0,71	7,86	13,18	15,02	18,41	17,76	17,88	17,14	18,43

Taula 5.3.6 Resultats de cobertura del conjunt ferrocarril i metro en base a les àrees d'influència geomètriques a les línies.

### 5.3.4 Municipis

Per aquest quart mètode la cobertura es calcula en base als límits municipals, considerant que si el municipi conté un segment de línia, aquest es troba cobert en la seva totalitat i en cas contrari no.

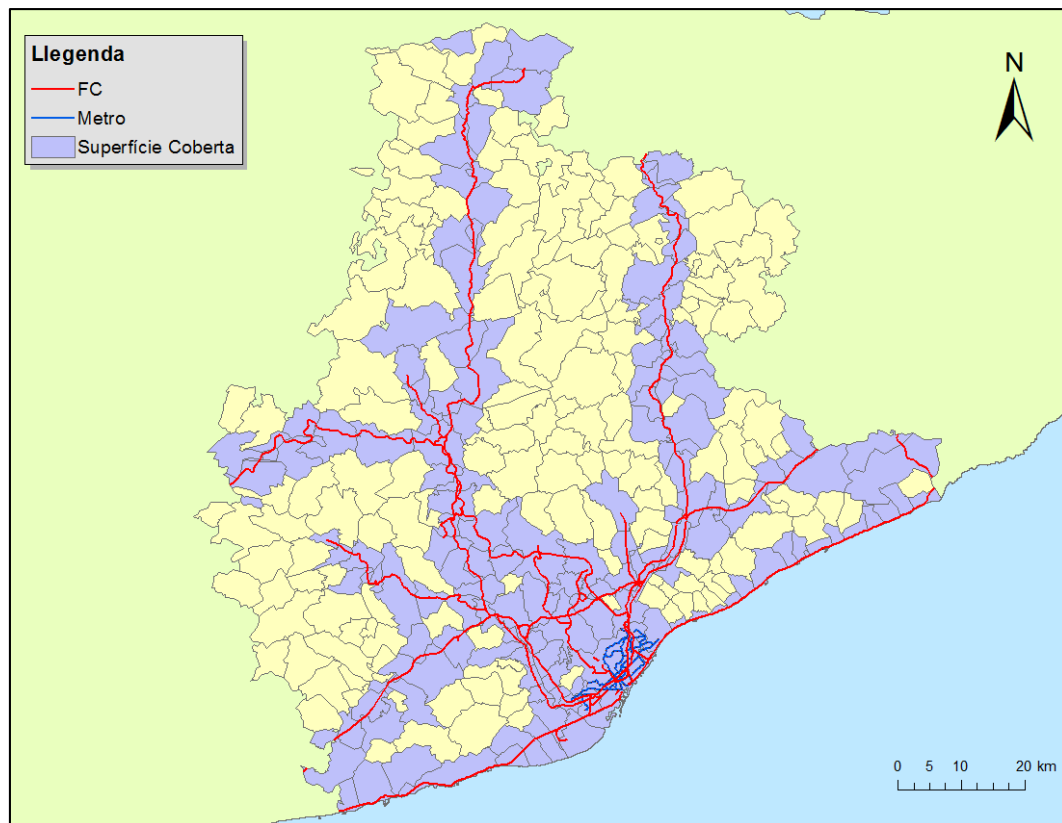


Figura 5.3.4 Superfície total coberta a partir dels límits municipals.

	1850	1870	1890	1910	1930	1950	1970	1990	2010
<b>km2</b>	167,9	1585,5	2696,0	3019,8	3359,4	3254,5	3156,5	2671,7	2671,7
<b>%</b>	2,17	20,52	34,90	39,09	43,49	42,13	40,86	34,58	34,58

Taula 5.3.7 Resultats de cobertura del conjunt ferrocarril i metro en base als límits municipals.

Abans d'entrar en l'anàlisi numèric, per a aquesta simplificació de la observació del plànol de cobertura obtingut, se'n deriven algunes incongruències, més enllà de la pròpia simplificació, que posen en dubte la validesa del mètode. Se'n recullen alguns detalls per facilitar-ne la visualització:

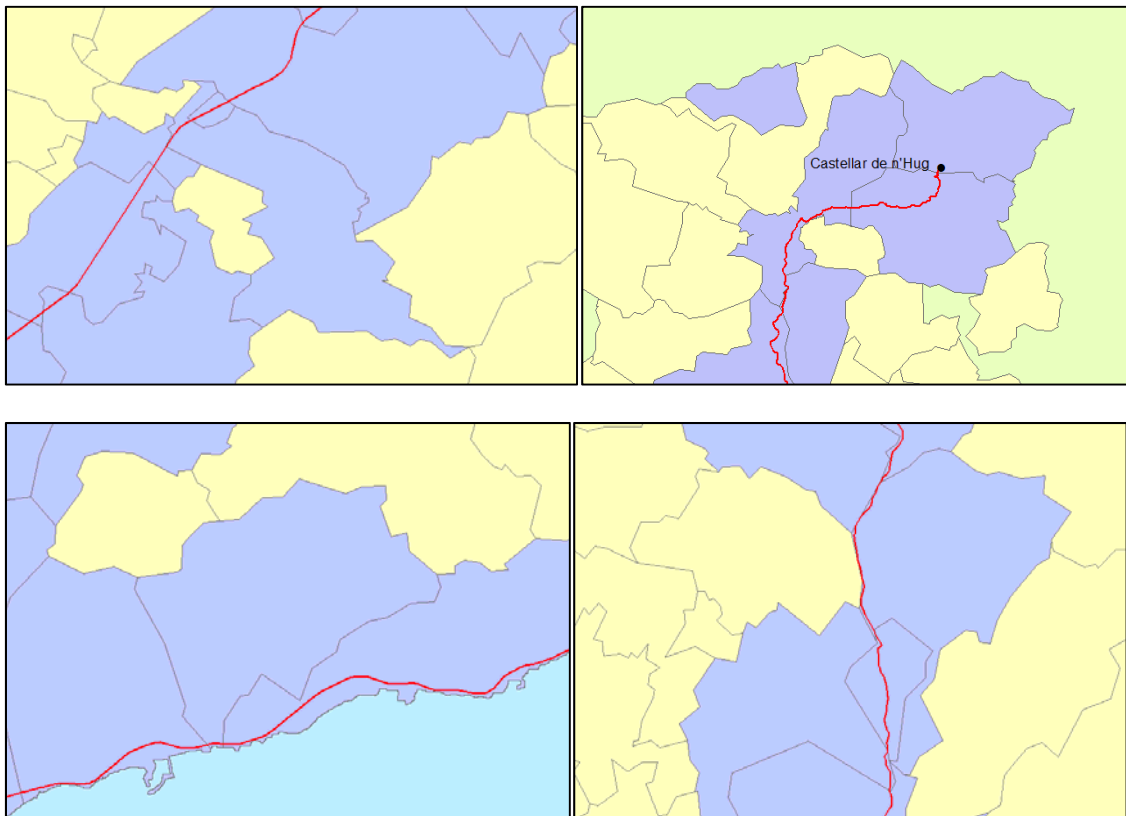


Figura 5.3.5 Detalls de cobertura en base als límits municipals.

En primer lloc, es donen casos en que un municipi no es considera cobert perquè no es travessat per cap línia, però tot el seu voltant pertany a municipis més extensos i per tant si que es considera cobert. A la inversa també pot passar que una demarcació estigui dividida en



més d'un sector, de manera que es consideren tots coberts tot i que es trobin més lluny de la línia que altres municipis considerats no coberts.

En segon lloc, també es pot donar el cas que una línia discorri pràcticament per sobre d'un límit municipal però sense arribar a creuar-lo, de manera que es genera una asimetria en la cobertura. I al contrari, que una línia creui mínimament un municipi, considerant-lo totalment cobert independentment de la seva extensió.

### 5.3.5 Comparatiu

Es presenten de manera agrupada els resultats de cobertura en termes absoluts, calculats segons els 4 mètodes:

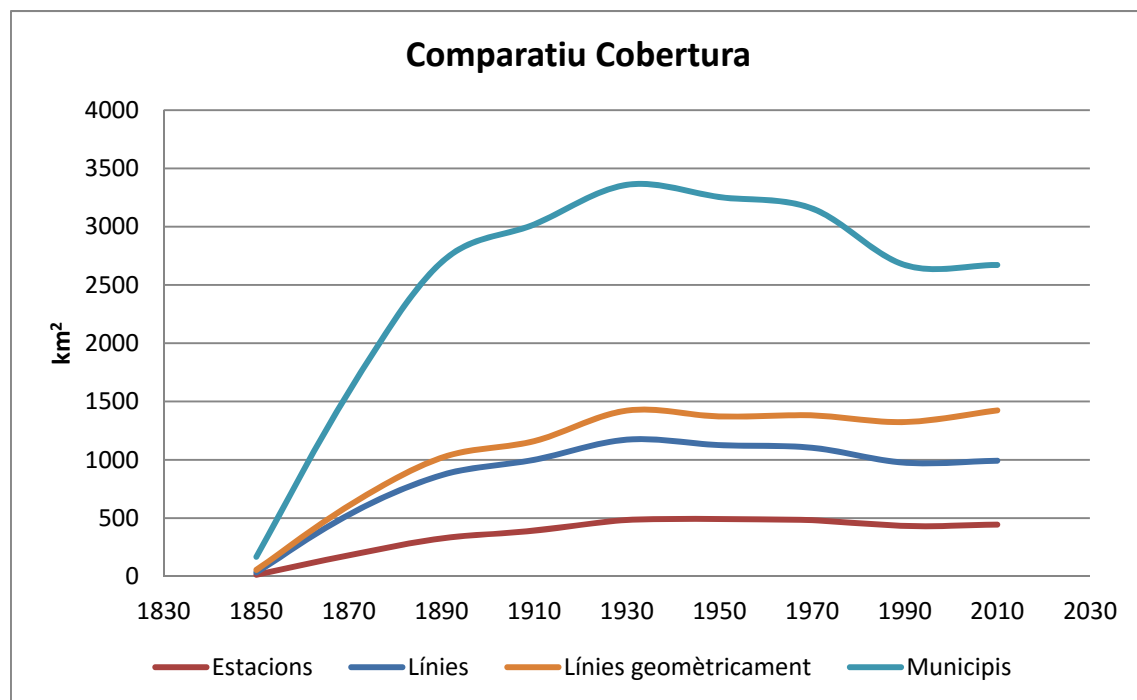


Figura 5.3.6 Comparatiu dels resultats de cobertura segons les simplificacions introduïdes.

En les tres simplificacions considerades, es produeix una variació a l'alça de l'indicador respecte el primer mètode calculat, obtenint resultats que van des de duplicar la superfície coberta en el millor dels casos, fins a considerar-la 13 cops superior.

	1850	1870	1890	1910	1930	1950	1970	1990	2010
<b>Línies</b>	2,6	2,9	2,7	2,6	2,4	2,3	2,3	2,3	2,2
<b>Línies geom.</b>	4,2	3,4	3,1	3,0	2,9	2,8	2,9	3,1	3,2
<b>Municipis</b>	12,9	8,8	8,3	7,7	6,9	6,6	6,6	6,2	6,0

Taula 5.3.8 Relació entre superfície coberta aproximada i real.

En la primera de les simplificacions, el principal factor determinant de l'error és la distància entre estacions, la qual va variant en funció del grau de consolidació de la xarxa a cada període. De manera mitjana l'evolució del paràmetre ha resultat en els següents valors:

	1850	1870	1890	1910	1930	1950	1970	1990	2010
<b>Longitud</b>	27,6	303,5	509,2	580,2	711,1	685,9	690,5	662,0	711,9
<b>Estacions</b>	7	73	126	156	215	225	246	276	312
<b>Espaiament</b>	3,94	4,16	4,04	3,72	3,31	3,05	2,81	2,40	2,28

Taula 5.3.9 Càlcul de l'evolució de l'espaiament mig entre estacions.

L'espaiament també varia dins d'un mateix període, en funció de la distància al centre d'influència, ja que com més al centre més consolidada es troba la infraestructura i la distància entre estacions és inferior. Encara més quan la xarxa de ferrocarril es troba recolzada per una xarxa urbana de metro.

Per tant, aquesta simplificació tindria poc error aplicada sobre xarxes amb un grau de desenvolupament elevat o sobre una xarxa de metro on la distància entre estacions és inferior, però aplicada sobre xarxes poc desenvolupades induïx a resultats amb un gran sobredimensionament.

Continuant amb l'anàlisi de les metodologies, la segona de les simplificacions, com s'observa induïx un error major, però l'interès d'aquesta rau en que si es considera com a simplificació del segon mètode, l'augment d'error és inferior en el causat en el primer pas, i com que no té en consideració el solapament entre línies, és més efectiu per a xarxes menys desenvolupades i més allunyades del centre, donant millors resultats en períodes inicials.

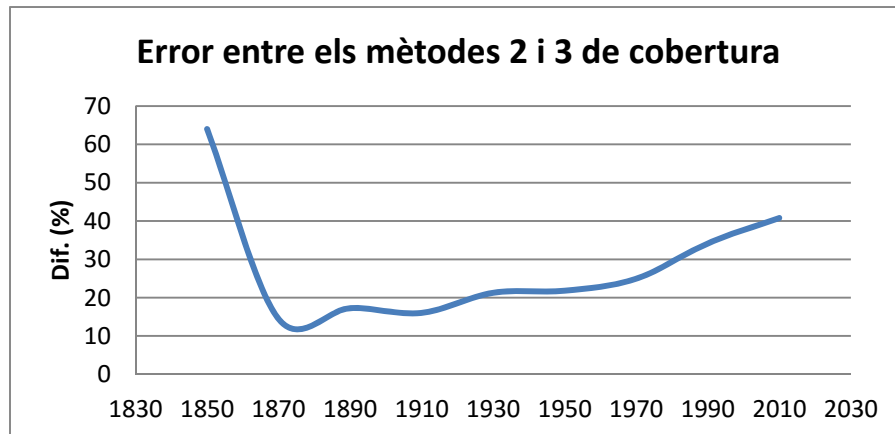


Figura 5.3.7 Evolució de la variació entre els mètodes 2 i 3 de cobertura.

En termes generals, es comprova com per períodes inicials, l'error es manté força baix i a mesura que es va desenvolupant la xarxa, causa més variació degut als solapaments produïts. Com a particularitat, el primer període conté un error més elevat degut a que la única línia existent, Barcelona – Mataró, discorre per la costa molt propera al mar i la simplificació adoptada no té en compte aquest factor.

Un altre factor a tenir en compte en aquesta simplificació és la geografia i els paràmetres de disseny de la infraestructura, ja que per a traçats sinuosos amb radis de curvatura reduïts, el càlcul tendirà a incrementar-se, mentre que per a traçats més rectilinis, i amb radis de curvatura amples, com pot ser el cas de l'Alta Velocitat, el càlcul s'ajustarà més al mètode precedent.

Per tant aquest mètode podria ser molt útil per a fases inicials, un cop s'accepta que la primera simplificació és vàlida, doncs l'error afegit és molt menys important i les avantatges a nivell de càlcul i velocitat són inqüestionables.

Per últim el càlcul en base als municipis, dóna diferències molt grans des d'un bon principi i de manera continuada en els períodes posteriors, amb un gran salt qualitatiu respecte les anteriors simplificacions.

En la línia de l'estratègia seguida en l'anàlisi de l'indicador de fractalitat, s'intentarà verificar el comportament descrit en l'àmbit metropolità i urbà, limitant els càlculs a les mateixes àrees de 10 i 25 km de radi.

En primer lloc s'ha comparat el primer mètode, amb àrees d'influència a les estacions, amb el segon, amb àrees d'influència a les línies:

Resultats per a àrea de radi 25 km:

Km <sup>2</sup>	1850	1870	1890	1910	1930	1950	1970	1990	2010
<b>Estacions</b>	11,2	91,1	123,4	136,7	190,3	198,0	207,7	239,6	264,3
<b>Línies</b>	29,9	205,7	278,3	289,8	382,7	365,5	369,8	385,1	405,6
<b>Dif (%)</b>	167,36	125,75	125,55	111,97	101,10	84,65	78,05	60,74	53,44

Taula 5.3.10 Comparació entre els mètodes 1 i 2 de cobertura, per a àmbit urbà.

Resultats per a l'àrea de 10 km de radi:

Km <sup>2</sup>	1850	1870	1890	1910	1930	1950	1970	1990	2010
<b>Estacions</b>	4,1	48,8	55,3	65,5	77,1	80,8	83,9	101,6	110,9
<b>Línies</b>	13,4	71,0	82,2	91,0	105,4	105,4	109,7	117,9	125,1
<b>Dif. (%)</b>	228,0	45,44	48,56	38,88	36,70	30,58	30,85	16,01	12,87

Taula 5.3.11 Comparació entre els mètodes 1 i 2 de cobertura, per a àmbit metropolità.

Dels resultats obtinguts, es demostra com per a aquest tipus d'àmbits, i en fases més avançades, la variació induïda per la simplificació es redueix considerablement, arribant a un punt on queda acotat al voltat del 15%, molt distant de la consideració inicial on prenia un mínim del 120% de variació.

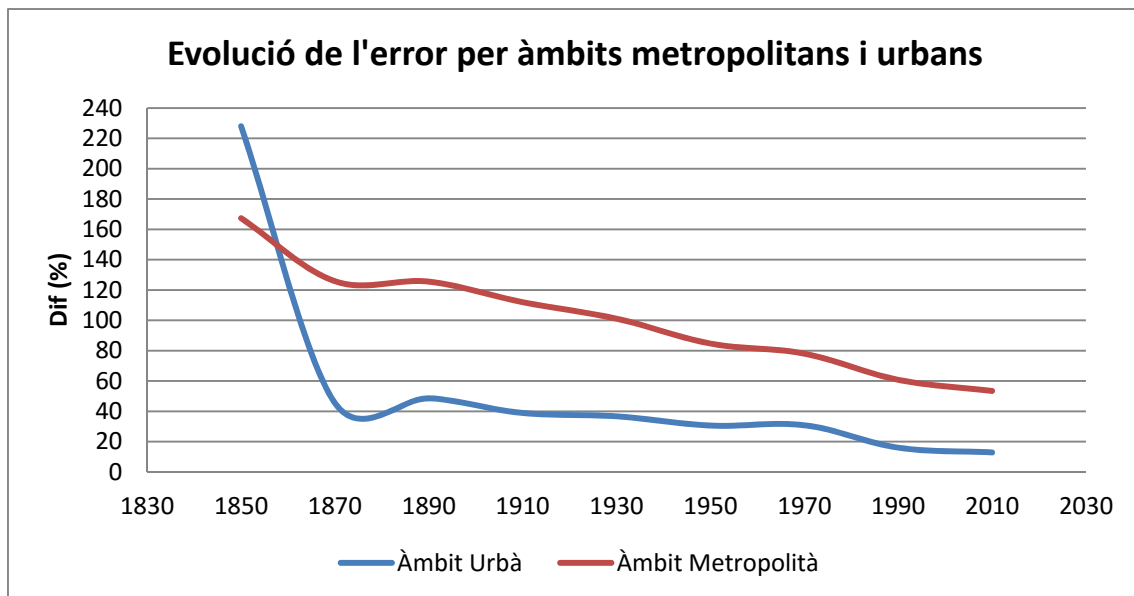


Figura 5.3.8 Evolució de l'error entre els mètodes 1 i 2 de cobertura, per àmbits urbans i metropolitans.

A més, si s'analitza la tendència en l'evolució, per a l'àmbit urbà, la pendent és bastant plana, obtenint variacions acotades des de períodes mitjans, que finalment es redueixen bastant a partir de l'etapa d'expansió mitja del metro també.

En el cas de l'àmbit metropolità l'error pateix més variació, doncs el grau de desenvolupament és inferior que en l'àmbit urbà.

En segon lloc s'ha comparat la utilitat del tercer mètode enfront el segon, com ja s'ha comentat, aquesta simplificació mostra ser més ajustada en el cas d'àmbits interurbans, i en segona instància per a fases inicials en àmbits urbans.

Per tant la comparació s'ha dut a terme exclouent de la superfície total, primer l'àmbit urbà, i en segon lloc l'àmbit metropolità.

Resultats per a l'àrea a partir de 10 km:

	1850	1870	1890	1910	1930	1950	1970	1990	2010
<b>GIS</b>	20,2	459,3	786,3	909,0	1067,3	1020,6	995,5	869,1	886,1
<b>Geom.</b>	35,6	511,0	900,1	1034,6	1249,0	1189,7	1148,8	1019,7	1061,9
<b>Dif. (%)</b>	75,70	11,25	14,48	13,81	17,02	16,57	15,40	17,33	19,83

Taula 5.3.12 Comparació entre els mètodes 2 i 3 de cobertura, exclouent l'àmbit urbà.

Resultats per a l'àrea a partir de 25 km:

	1850	1870	1890	1910	1930	1950	1970	1990	2010
<b>GIS</b>	3,8	324,6	590,2	710,2	790,0	760,5	735,5	601,8	605,7
<b>Geom.</b>	4,7	357,1	655,3	784,7	898,2	864,1	823,3	684,7	684,6
<b>Dif. (%)</b>	23,28	10,02	11,03	10,49	13,69	13,62	11,94	13,77	13,04

Taula 5.3.13 Comparació entre els mètodes 2 i 3 de cobertura, excloent l'àmbit urbà i metropolità.

S'observa com tret del primer període on com ja s'ha vist la proximitat al mar, penalitza l'aproximació, en la resta la variació obtinguda s'acota ràpidament a un màxim del 20 %, arribant a ajustos del 10 %, que ja en un primer moment queden molt allunyats dels màxims de 40 %, obtinguts en l'anàlisi de l'àmbit provincial. I encara molt més de la variació comesa en la primer simplificació.

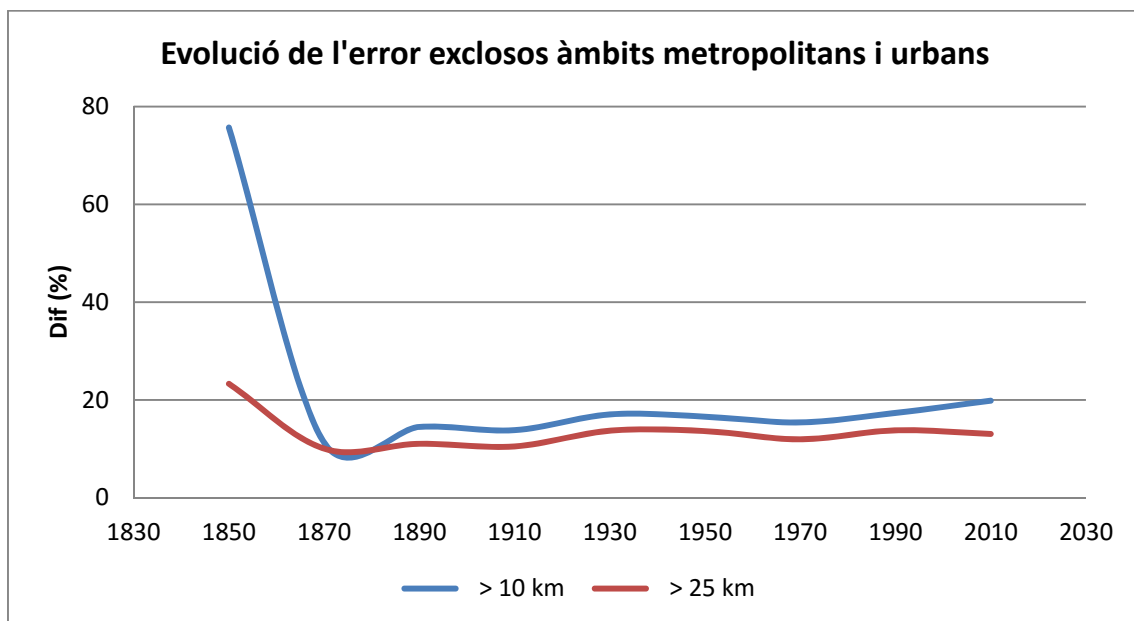


Figura 5.3.9 Evolució de l'error entre els mètodes 2 i 3 de cobertura, excloent àmbits urbans i metropolitans.

A més com mostra la visualització gràfica dels resultats, en els dos casos, el pendent és molt suau, fet que demostra que la variació entre períodes és petita, un cop descomptat el principal pol de la xarxa, obtenint un acotament de l'error vàlid per a qualsevol període.

## 5.4 Densitat i Dotació

En aquest quart apartat d'anàlisi, no es pretén realitzar comparacions entre mètodes, ja que com s'ha vist en el capítol 4, aquests depenen dels indicadors calculats prèviament.

L'objectiu és veure l'evolució d'aquests indicadors topològics que s'acostumen a utilitzar en estudis de xarxes de transport, per tal d'establir relacions entre ells i amb els resultats obtinguts fins al moment.

Per fer-ho s'han calculat aquests dos indicadors en base a la població i a la superfície dels municipis coberts, donat que la població està referida a aquests límits.

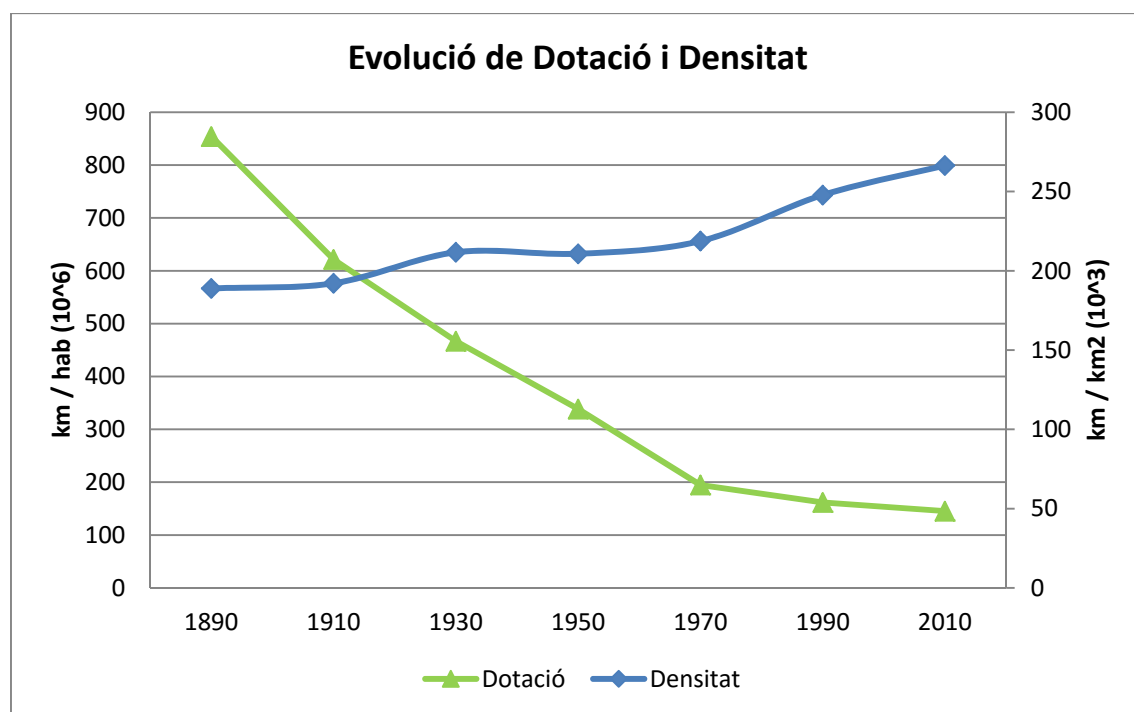


Figura 5.4.1 Evolució de la dotació i la densitat.

Mentre la densitat manté un comportament creixent sostingut, la dotació decreix degut a que la població creix a un ritme molt més ràpid que no pas la xarxa ferroviària que protagonitza el seu principal creixement durant la segona meitat del s.XIX.

En aquest punt és interessant veure com ha influenciat el desenvolupament del ferrocarril en el creixement de la població en els diferents municipis. Per fer-ho es compararan els mapes de distribució de població al 1890 i al 1990, on es recull la densitat de població expressada en hab /km<sup>2</sup>, en base als municipis.

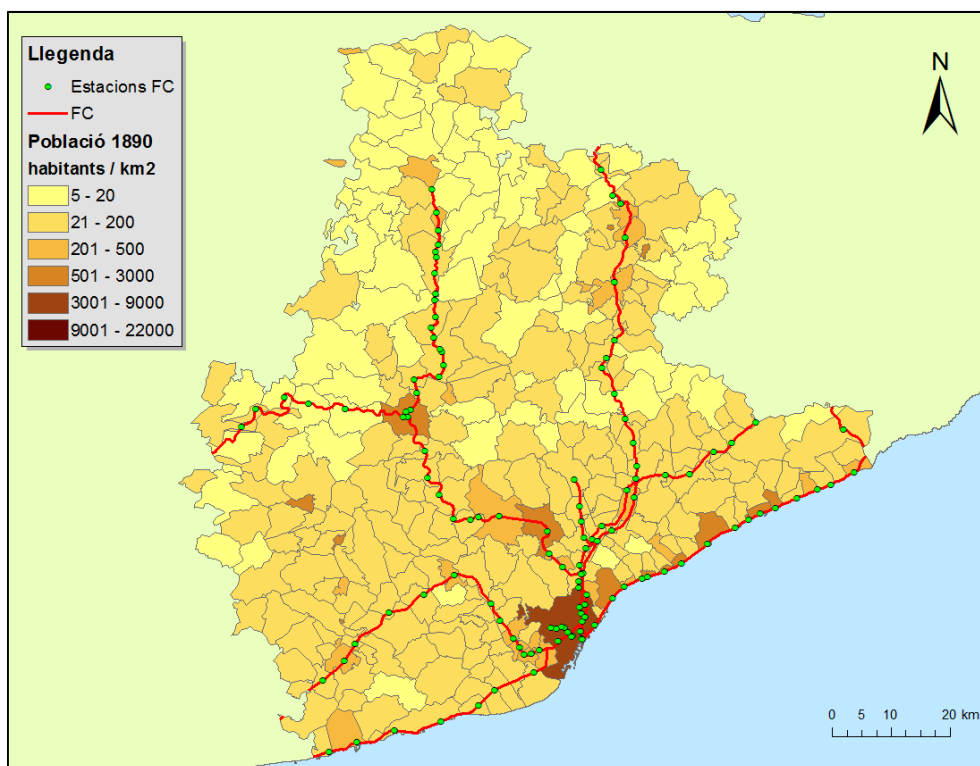


Figura 5.4.2 Distribució de la població al 1890.

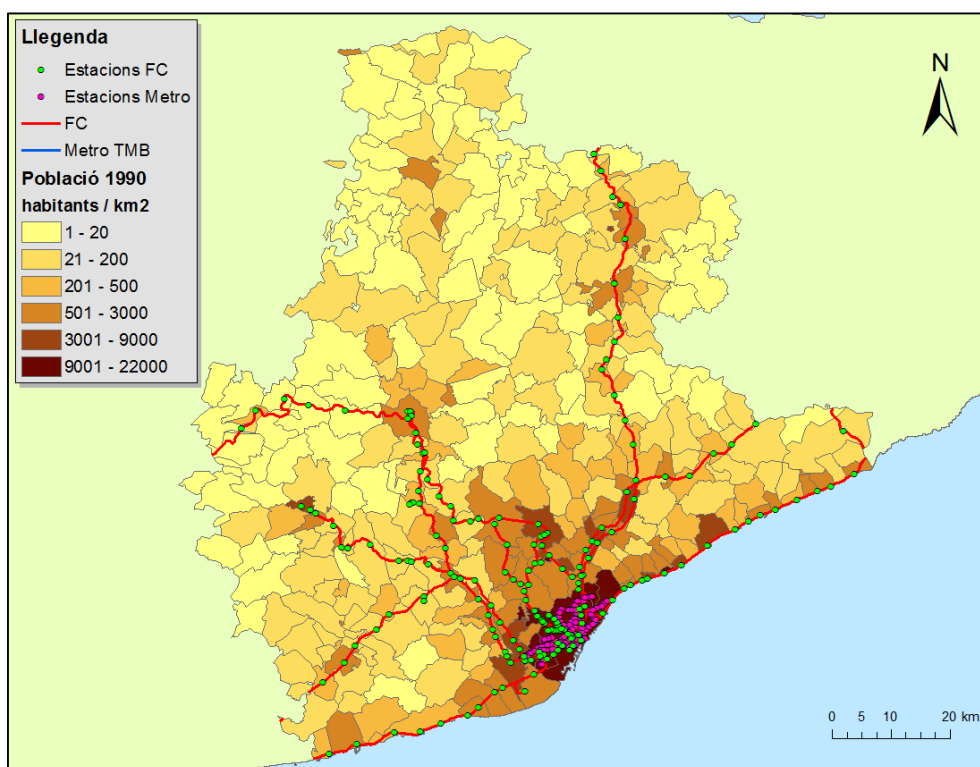


Figura 5.4.3 Distribució de la població al 1990.



Com s'observa en els 100 anys de diferència, la homogeneïtat del primer període, es perd completament en el darrer<sup>11</sup>, notant una baixada de la densitat en aquells municipis no servits per la xarxa. Paral·lelament, aquells municipis que si estan servits, augmenten, o almenys mantenen la seva població i en el cas de la Regió Metropolitana de Barcelona, l'augmenten de forma molt més notòria.

Aquest exemple, és una clara evidència de com els sistemes de transport són elements dinàmics, les accions sobre els quals repercuteixen directament en la organització i evolució del territori al que serveixen.

Per altra banda, es podria pensar que a l'hora de normalitzar un indicador, en base a d'altres, l'error causat en fases inicials pot quedar mitigat. En termes de valor absolut això és cert, doncs donat que els paràmetres de superfície i població són de 3 a 6 ordres de magnitud superior al de longitud de línia, al realitzar les corresponents divisions, els valors obtinguts són molt petits.

Ara bé en termes relatius, que són els que es prenen normalment, el que succeeix és que l'error es manté, i a més si es considera que els indicadors de població i superfície també poden contenir error, la variació final obtinguda en termes relatius es transforma en la suma dels errors relatius previs, augmentant en tot cas.

Finalment, i per concloure amb aquests indicadors, en algun cas es planteja l'aproximació de l'indicador de dotació a través del de densitat en els casos que no es disposa de cens històric de població. De l'anàlisi del primer gràfic, es deriva que ni tan sols el comportament evolutiu s'assembla en aquest cas.

---

<sup>11</sup> La resta de períodes es poden consultar a l'Annex 2.

## 5.5 Accessibilitat

En l'anàlisi d'aquest indicador, degut a la complexitat i a les variables de càlcul que requereix per al seu càlcul exacte, es seguirà una estratègia diferent als anteriors.

Molts estudis, s'han centrat en calcular l'accessibilitat, tant en xarxes actuals, com de manera evolutiva, tots amb les seves simplificacions intrínseques.

En aquest treball es pretén introduir la versatilitat d'eines com *Google Maps*, que recullen gran quantitat d'informació sobre freqüències de pas i horaris, per tal de comparar els valor obtinguts amb aquesta eina, que es consideraran com els més propers a la definició completa de l'indicador, i els valors de l'indicador calculats a partir de la simplificació descrita en el capítol anterior.

Entre d'altres, *Google Maps*, permet calcular els temps exactes de transbord i els itineraris d'accés o sortida de l'estació al centre de cada població a partir de la quadrícula definida per la trama urbana, mentre que el mètode simplificat els calcula a partir de línies rectes.

Per a la realització d'aquesta variant d'estudi, s'ha limitat el càlcul a una porció de la xarxa, ja que si bé el càlcul del mètode simplificat es desenvoluparà amb l'ajuda de l'aplicació *Network Analyst* del programari d'*ArcGIS*, el càlcul amb *Google Maps* requereix de la introducció dels itineraris un per un.

La subxarxa definida, parteix de la configuració al darrer període 2010, de manera que no hagi patit canvis fins a la data actual, i es defineix per les línies compreses entre Vilafranca del Penedès i Martorell (RENFE), entre Martorell i Manresa (FGC) i entre Martorell i Cornellà (RENFE). Creant una xarxa radial amb centre a Martorell de 76,25 km de via. Alhora s'ha definit d'aquesta manera per tal de que inclogués almenys un transbord en el sistema, essent l'estació de Martorell, l'enllaç entre els trams.

La subxarxa resultant està integrada per 18 estacions, doncs s'ha decidit deixar una sola estació per municipi, considerant-ne la principal en cas que n'hi hagi més d'una, per tal de no incórrer en errors derivats de la tria de l'estació més propera en els diferents programes utilitzats. Les estacions i els respectius termes municipals considerats són:

Martorell – Vilafranca:

- Martorell
- Gelida
- Sant Sadurní d'Anoia
- Lavern-Subirats
- La Granada
- Vilafranca del Penedès

Martorell – Manresa:

- Martorell
- Abrera
- Olesa de Montserrat
- Monistrol
- Castellbell i el Vilar
- Sant Vicenç | Castellgalí
- Manresa Viladordis

Martorell – Cornellà:

- Martorell
- Castellbisbal
- El Papiol
- Molins de Rei
- Sant Feliu de Llobregat
- Sant Joan Despí
- Cornellà

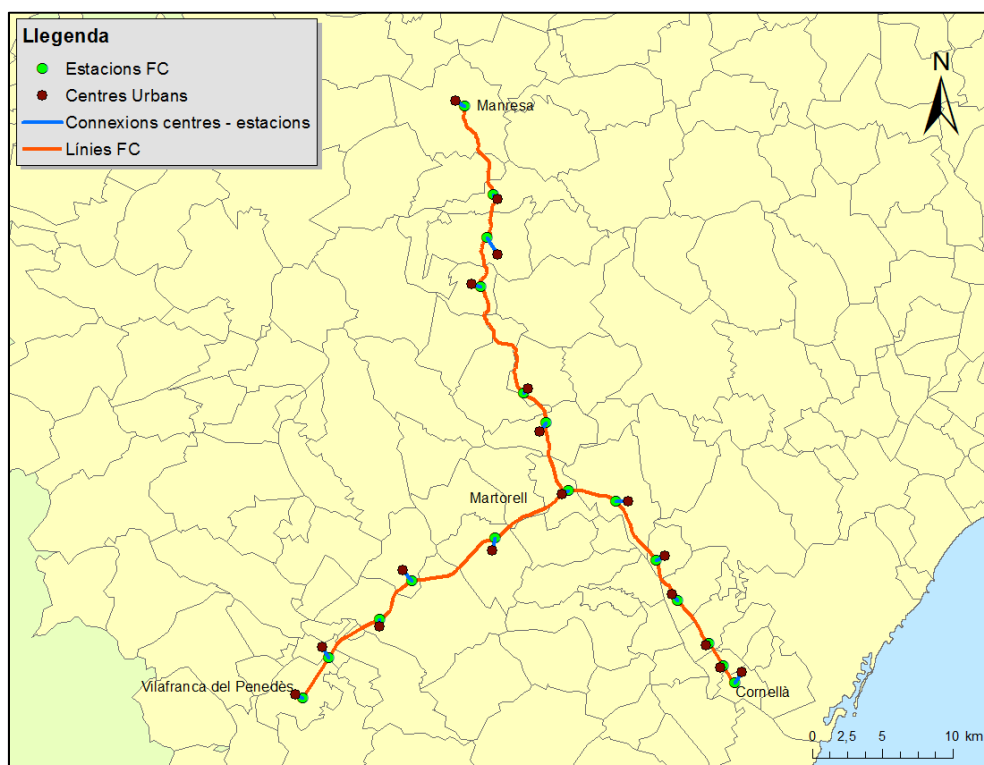


Figura 5.5.1 Representació de la xarxa considerada per al càlcul de l'accessibilitat.

### 5.5.1 Consideracions referents als mètodes de càlcul de l'accessibilitat

#### **Google Maps:**

D'una banda s'han tingut en compte els centres històrics de les poblacions urbanes, definits prèviament en la reconstrucció de la xarxa.

De l'altra, i entrant en matèria de càlcul, l'itinerari calculat per aquesta eina, té en compte els horaris de pas de cada comboi, fet que esdevé en diferents temps de viatge a cada moment del dia. Com a solució s'ha adoptat la mitja dels temps d'un dia feiner en horari de matí.

Aquest mètode però negligeix el temps d'espera, ja que es calcula l'itinerari a partir de l'hora de sortida mínima per tal de poder accedir al tren, reduint a 0 el temps d'espera.

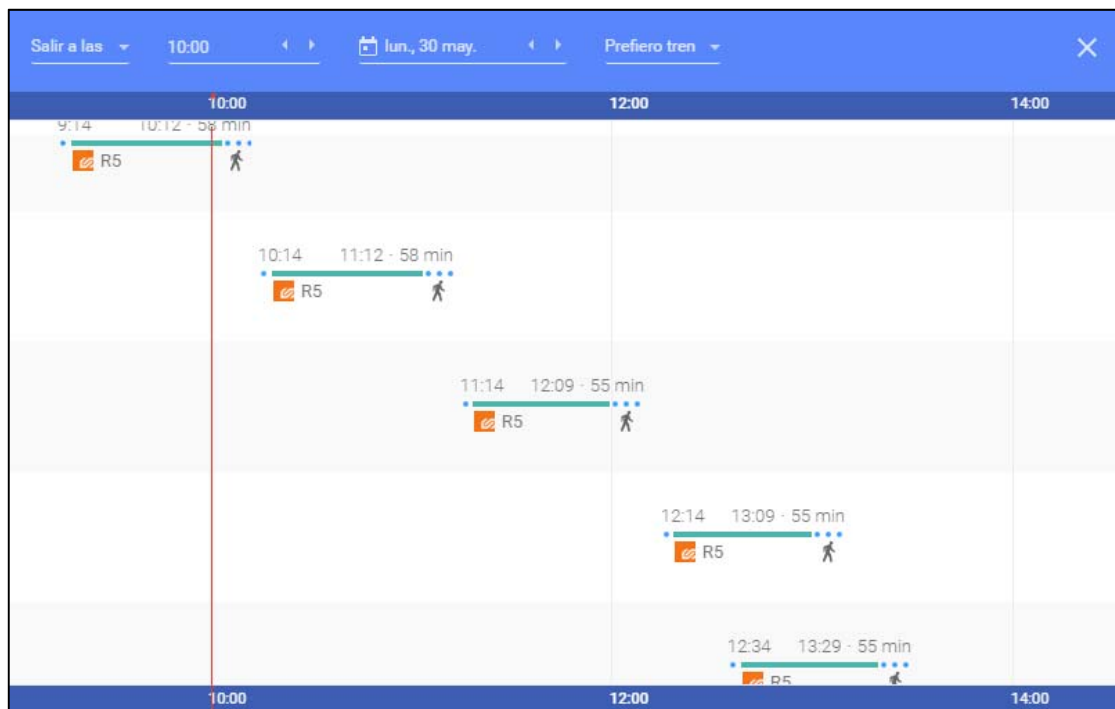


Figura 5.5.2 Exemple de càlcul amb Google Maps.

#### **Network Analyst:**

Per al càlcul del mètode simplificat, es considera la distància d'accés i sortida com una línia recta entre l'estació i el centre de la població, i la distància en el mitjà de transport com la suma de la longitud dels arcs entre els punt d'origen i destí, pel camí més curt.

La velocitat a peu considerada ha estat de 4 km/h, mentre que la velocitat del ferrocarril s'ha considerat de 50 km/h.

Alhora s'intentarà aplicar diferents velocitats comercials mitges per veure com influeix la correcta acotació del paràmetre en el resultat final.

Resultats obtinguts a partir de *Google Maps* (mètode complex, temps en hores):

Orígens Destins	Vilafran- ca	La Granada	Lavern- Subirats	Sant Sadurní d'Anoia	Gelida	Marto- rell	Abrera	Olesa de M.	Monis- trol	Castell- bell i el Vilar	Sant Vicenç de C.	Manresa	Castell- bisbal	El Papiol	Molins de Rei	Sant Feliu	Sant Joan Despí	Cornellà
Vilafranca		0,38	0,47	0,53	0,67	0,62	1,12	1,12	1,47	1,73	1,50	1,65	0,92	0,93	0,85	0,82	0,88	1,10
La Granada	0,42		0,47	0,55	0,70	0,63	1,13	1,13	1,48	1,72	1,50	1,68	0,92	0,93	0,85	0,82	0,88	1,10
Lavern – S.	0,52	0,48		0,52	0,67	0,60	1,25	1,25	1,45	1,70	1,45	1,65	0,88	0,90	0,82	0,78	0,85	1,07
S. Sadurní d'A.	0,55	0,55	0,50		0,62	0,55	1,05	1,05	1,40	1,65	1,42	1,60	0,83	0,85	0,77	0,73	0,80	1,02
Gelida	0,77	0,77	0,72	0,68		0,60	1,10	1,10	1,45	1,70	1,45	1,65	0,88	0,90	0,82	0,78	0,85	1,07
Martorell	0,62	0,62	0,57	0,53	0,52		0,37	0,37	0,72	0,97	0,72	0,92	0,55	0,57	0,48	0,45	0,52	0,73
Abrera	0,98	0,95	0,90	0,87	0,85	0,37		0,33	0,68	0,93	0,68	0,88	0,92	0,97	0,87	0,88	0,90	1,13
Olesa de M.	0,98	0,95	0,90	0,87	0,85	0,37	0,32		0,57	0,82	0,57	0,77	1,03	0,93	0,85	0,83	0,90	1,13
Monistrol	1,33	1,30	1,25	1,22	1,20	0,72	0,67	0,57		0,78	0,53	0,73	1,38	1,28	1,20	1,18	1,25	1,65
Castellbell i V.	1,60	1,57	1,52	1,48	1,47	0,98	0,93	0,83	0,80		0,65	0,85	1,47	1,55	1,47	1,45	1,52	1,75
S. Vicenç de C.	1,33	1,30	1,25	1,22	1,20	0,72	0,67	0,57	0,53	0,63		0,40	1,38	1,33	1,20	1,23	1,30	1,48
Manresa	1,53	1,50	1,45	1,42	1,40	0,92	0,87	0,77	0,73	0,83	0,42		1,58	1,53	1,40	1,43	1,50	1,68
Castellbisbal	1,07	1,03	0,98	0,95	0,93	0,68	1,10	1,10	1,45	1,70	1,45	1,70		0,80	0,73	0,70	0,77	0,98
El Papiol	1,03	1,00	0,95	0,92	0,90	0,65	0,97	1,13	1,48	1,73	1,48	1,72	0,77		0,52	0,48	0,55	0,77
Molins de Rei	0,88	0,85	0,80	0,77	0,75	0,50	0,98	0,98	1,33	1,58	1,33	1,57	0,62	0,45		0,22	0,30	0,52
Sant Feliu	0,88	0,85	0,80	0,77	0,75	0,50	0,98	0,98	1,33	1,58	1,33	1,58	0,62	0,45	0,25		0,15	0,37
S. Joan Despí	0,95	0,90	0,85	0,82	0,80	0,55	1,03	1,03	1,38	1,63	1,38	1,62	0,67	0,50	0,30	0,13		0,35
Cornellà	1,13	1,13	1,10	1,05	1,03	0,78	1,27	1,27	1,62	1,87	1,62	1,85	0,90	0,73	0,53	0,37	0,37	

Taula 5.5.1 Matriu origen – destí del mètode complex accessibilitat.

Resultats obtinguts amb *Network Analyst* (mètode simplificat, temps en hores):

Orígens Destins	Vilafran- ca	La Granada	Lavern- Subirats	Sant Sadurní d'Anoia	Gelida	Marto- rell	Abrera	Olesa de M.	Monis- trol	Castell- bell i el Vilar	Sant Vicenç de C.	Manresa	Castell- bisbal	El Papiol	Molins de Rei	Sant Feliu	Sant Joan Despí	Cornellà
Vilafranca		0,42	0,44	0,63	0,73	0,78	0,94	0,93	1,16	1,42	1,25	1,42	0,93	0,99	1,03	1,02	1,06	1,26
La Granada	0,42		0,43	0,63	0,72	0,78	0,94	0,92	1,15	1,42	1,25	1,42	0,93	0,99	1,03	1,02	1,06	1,26
Lavern – S.	0,44	0,43		0,46	0,55	0,61	0,77	0,75	0,98	1,25	1,08	1,25	0,76	0,82	0,86	0,85	0,89	1,08
S. Sadurní d'A.	0,63	0,63	0,46		0,60	0,65	0,81	0,80	1,03	1,30	1,12	1,29	0,80	0,86	0,90	0,89	0,93	1,13
Gelida	0,73	0,72	0,55	0,60		0,47	0,63	0,61	0,84	1,11	0,94	1,11	0,62	0,68	0,72	0,71	0,75	0,94
Martorell	0,78	0,78	0,61	0,65	0,47		0,43	0,42	0,65	0,92	0,74	0,91	0,43	0,48	0,52	0,51	0,55	0,75
Abrera	0,94	0,94	0,77	0,81	0,63	0,43		0,36	0,59	0,86	0,68	0,86	0,59	0,64	0,68	0,67	0,72	0,91
Olesa de M.	0,93	0,92	0,75	0,80	0,61	0,42	0,36		0,46	0,73	0,56	0,73	0,57	0,63	0,67	0,66	0,70	0,90
Monistrol	1,16	1,15	0,98	1,03	0,84	0,65	0,59	0,46		0,59	0,42	0,59	0,80	0,86	0,90	0,89	0,93	1,13
Castellbell i V.	1,42	1,42	1,25	1,30	1,11	0,92	0,86	0,73	0,59		0,53	0,70	1,07	1,13	1,17	1,16	1,20	1,40
S. Vicenç de C.	1,25	1,25	1,08	1,12	0,94	0,74	0,68	0,56	0,42	0,53		0,39	0,90	0,96	0,99	0,99	1,03	1,22
Manresa	1,42	1,42	1,25	1,29	1,11	0,91	0,86	0,73	0,59	0,70	0,39		1,07	1,13	1,17	1,16	1,20	1,39
Castellbisbal	0,93	0,93	0,76	0,80	0,62	0,43	0,59	0,57	0,80	1,07	0,90	1,07		0,50	0,54	0,53	0,57	0,76
El Papiol	0,99	0,99	0,82	0,86	0,68	0,48	0,64	0,63	0,86	1,13	0,96	1,13	0,50		0,39	0,38	0,42	0,62
Molins de Rei	1,03	1,03	0,86	0,90	0,72	0,52	0,68	0,67	0,90	1,17	0,99	1,17	0,54	0,39		0,29	0,33	0,52
Sant Feliu	1,02	1,02	0,85	0,89	0,71	0,51	0,67	0,66	0,89	1,16	0,99	1,16	0,53	0,38	0,29		0,17	0,36
S. Joan Despí	1,06	1,06	0,89	0,93	0,75	0,55	0,72	0,70	0,93	1,20	1,03	1,20	0,57	0,42	0,33	0,17		0,33
Cornellà	1,26	1,26	1,08	1,13	0,94	0,75	0,91	0,90	1,13	1,40	1,22	1,39	0,76	0,62	0,52	0,36	0,33	

Taula 5.5.2 Matriu origen – destí del mètode simplificat d'accessibilitat.

Realitzant el sumatori per files, s'obté el temps mig d'accés a cada nodes des de tots els altres:

$$a_i = \frac{\sum_j t_{ij}}{n - 1}$$

	Mètode Complex	Mètode Simplificat	Dif. (%)
Vilafranca	1,05	1,03	1,92
La Granada	1,06	1,02	3,28
Lavern-Subirats	1,05	0,86	17,91
Sant Sadurní d'Anoia	1,00	0,93	6,83
Gelida	1,08	0,79	26,44
Martorell	0,64	0,66	-3,97
Abrera	0,88	0,75	14,35
Olesa de Montserrat	0,85	0,71	16,20
Monistrol	1,14	0,87	23,41
Castellbell i el Vilar	1,37	1,12	18,06
Sant Vicenç de C.	1,11	0,94	15,21
Manresa	1,31	1,11	15,22
Castellbisbal	1,13	0,77	31,83
Papiol	1,07	0,78	26,89
Molins de Rei	0,90	0,79	12,07
Sant Feliu	0,89	0,77	13,57
Sant Joan Despí	0,93	0,80	13,88
Cornellà	1,16	1,00	14,24

Taula 5.5.3 Comparació del temps mig d'accés a cada node.

Per a calcular l'índex d'accessibilitat global de la xarxa, es calcula el temps mig d'accessibilitat global a partir dels anteriors:

$$A = \frac{\sum_i a_i}{n}$$

Mètode Complex	Mètode Simplificat	Dif. (%)
1,09	0,92	15,52

Taula 5.5.4 Comparació Índex Global d'Accessibilitat de la xarxa.

### 5.5.2 Anàlisi dels resultats de l'accessibilitat

De l'anàlisi dels resultats obtinguts, s'observa que amb el mètode simplificat, l'índex global d'accessibilitat es veu reduït en un 15,5 %.

Un aspecte a tenir en compte és que amb el mètode simplificat s'obté una matriu simètrica, mentre que amb el mètode complex la matriu perd aquesta propietat. Això és degut a la gran quantitat de paràmetres que intervenen, obtenint temps de recorregut diferents en funció del sentint en el que es realitza el trajecte.

Principalment s'estima que la variació es deu a tres factor principals que en conjunt produeixen la diferència global:

- Itinerari d'accés
- Velocitat comercial
- Transbordament

#### **Itinerari d'accés:**

En aquest sentit el càlcul amb *Google Maps*, com ja s'ha dit té en compte la trama urbana, però a més aplica velocitats de desplaçament diferents que varien en funció de les característiques de la ruta definida.

Així per exemple en nuclis com Gelida (26,4 %) o Castellbisbal (31,8 %), la diferència de temps obtinguda entre els dos mètodes augmenta respecte la resta, situant-se la mitja en 14,8 %. Això és degut a que la topografia, amb un gran desnivell entre l'estació i les respectives poblacions, fa reduir la velocitat amb la que l'usuari recorre el trajecte de sortida.

A tall d'exemple, en el cas de Gelida, si el recorregut es realitza en sentit descendent, la velocitat és considerada de 4,6 km/h, mentre que en sentit ascendent, es redueix a 3,7 km/h, ocasionant una variació del 25 %.

Per poder quantificar l'afectació d'aquest paràmetre, es requereix la segregació de l'itinerari, en cadascun dels mètodes, enlloc d'això es pretén quantificar-ho a partir de la valoració dels altres paràmetres.

#### **Velocitat comercial:**

Els resultats obtinguts han estat calculats en base a una velocitat comercial de 50 km/h, prenent com a referència la velocitat comercial de la R4 entre sant Vicenç i Manresa al 2010, situada en 47,95 km/h, segons dades de RENFE.

Per valorar aquest aspecte, s'ha eliminat la branca entre Martorell i Manresa, per evitar el temps de transbord, doncs entre Cornellà i Vilafranca hi discorre la mateixa línia R4. Per fer-ho simplement s'han eliminat les files i columnes de les matrius O-D, corresponents a les



estacions de la línia entre Martorell i Manresa, i tornant a calcular el temps d'accés a cada nucli.

	Mètode Complex	Mètode Simplificat	Dif. (%)
Vilafranca	0,74	0,85	-13,87
La Granada	0,75	0,84	-11,98
Lavern-Subirats	0,73	0,70	4,28
Sant Sadurní d'Anoia	0,71	0,77	-9,33
Gelida	0,80	0,68	15,39
Martorell	0,56	0,59	-6,18
Castellbisbal	0,88	0,67	23,56
Papiol	0,78	0,65	16,58
Molins de Rei	0,60	0,65	-6,93
Sant Feliu	0,58	0,61	-5,38
Sant Joan Despí	0,62	0,64	-3,52
Cornellà	0,83	0,82	1,29

Taula 5.5.5 Comparació del temps mig d'accés a cada node de l'àmbit reduït.

Mètode Complex	Mètode Simplificat	Dif. (%)
0,72	0,71	1,31

Taula 5.5.6 Comparació Índex Global d'Accessibilitat de la xarxa reduïda.

La diferència global obtinguda és de 1,3 %, si bé les diferències per a cada node són molt variables. Aquest fet és degut a la variació dels temps d'accés i sortida, en primer lloc perquè la precisió de *Google Maps*, és de 1 minut i en segon lloc perquè es consideren velocitats màximes de fins a 5,3 km/h, en el cas de Vilafranca per exemple amb un terreny molt planer i una trama urbana favorable per al vianant.

Si més no, aquest fet porta a la conclusió que adoptant una velocitat comercial suficientment propera a la real, i una velocitat d'accés i sortida conservadora, que permeti absorbir les diferències de traçat entre els dos mètodes, la variació del resultat produïda per la diferència de càlcul en els itineraris d'accés i sortida queda és molt baixa en comparació a la produïda per l'efecte de negligir el transbord.

### Transbordament

Per veure com varia la importància de la simplificació del transbord, s'han realitzat els càlculs per a diferents velocitats, tant del sistema ferroviari, com de l'usuari a peu.

Dif (%)		Velocitat usuari a peu (km/h)				
		3,5	4	4,5	5	5,5
Velocitat FC (km/h)	40	1,88	-3,07	-6,92	-10,00	-12,52
	45	-5,04	<b>-9,99</b>	<b>-13,84</b>	-16,92	-19,44
	50	-10,57	<b>-15,52</b>	<b>-19,38</b>	-22,46	-24,98
	55	-15,10	-20,05	-23,90	-26,99	-29,51
	60	-18,87	-23,83	-27,68	-30,76	-33,28

Taula 5.5.7 Variació per la simplificació, en funció de les velocitats.

Dif (%)		Velocitat usuari a peu (km/h)				
		3,5	4	4,5	5	5,5
Velocitat FC (km/h)	40	18,44	11,86	6,75	2,66	-0,68
	45	11,12	<b>4,55</b>	<b>-0,56</b>	-4,65	-8,00
	50	5,26	<b>-1,31</b>	<b>-6,42</b>	-10,51	-13,85
	55	0,47	-6,10	-11,21	-15,30	-18,64
	60	-3,52	-10,09	-15,20	-19,29	-22,64

Taula 5.5.8 Variació per la simplificació, en funció de les velocitats, per a la xarxa reduïda.

Dif (%)		Velocitat usuari a peu (km/h)				
		3,5	4	4,5	5	5,5
Velocitat FC (km/h)	40	-16,56	-14,94	-13,68	-12,67	-11,84
	45	-16,16	<b>-14,54</b>	<b>-13,28</b>	-12,27	-11,44
	50	-15,84	<b>-14,22</b>	<b>-12,96</b>	-11,95	-11,12
	55	-15,57	-13,95	-12,69	-11,69	-10,86
	60	-15,36	-13,74	-12,48	-11,47	-10,64

Taula 5.5.9 Variació causada per la simplificació del temps de transbordament.

Es comprova com el temps de transbord, està acotat entre un 10 i un 17% del total. Aquesta diferència en termes globals, té més o menys importància en termes relatius segons la variació introduïda prèviament en l'elecció de les velocitats de càlcul. Aquest segon factor, introdueix variacions de +/-20 %, que sumades a l'anterior indueixen diferències del -30%.

Així doncs, el transbordament juga un paper important quan les velocitats estan prou ajustades a les del sistema, considerades en aquests cas les proporcionades per *Google Maps*. En canvi per velocitats divergents a les reals, la variació que produeixen aquestes és més important i el transbord passa a ser secundari.

---

## 6 Conclusions

Al llarg dels anàlisis realitzats, es constata que les simplificacions adoptades en modelització històrica sobredimensionen els valors dels indicadors. Segueix un resum dels principals motius i les alteracions observades a cada indicador de forma quantitativa.

En primer lloc s'ha vist, que com a punt de partida, la modelització de la xarxa ferroviària es basa en nodes i arcs, formats per les estacions i els diferents trams de línia entre elles.

Per a la determinació de les estacions en servei, en estudis sobre xarxes actuals, no hi ha dificultats degut a la facilitat d'accés a la informació, però en estudis sobre la evolució de les xarxes és complicat obtenir aquesta informació i sovint és confusa i/o contradictòria. En modelització històrica, aquesta dificultat fa que sovint es busquin mètodes per treballar només amb l'indicador de longitud de xarxa.

Per al càlcul de la longitud de xarxa, s'ha vist com fins i tot abans de començar a realitzar els amidaments, el criteri adoptat pot fer variar el resultat obtingut.

Així doncs la xarxa de Metro de Barcelona, mesurada segons TMB i segons criteris de servei – mesurada igualment per TMB –, assoleix una variació de més del 3 %. Aquest factor és rellevant en el sentit que no representa una variació de recursos necessaris, sinó simplement d'adoptar criteris acceptats col·lectivament que homogeneïtzin els estudis realitzats.

Un altre aspecte que es considera que afecta al resultat de forma general, és la precisió de l'escala de treball. En el càlcul realitzat per al cas de Barcelona, s'ha determinat que el fet de treballar a escala 1:5.000 o a escala 1:50.000, provoca una variació d'entorn al 8 %. Per tant l'elecció de l'escala dependrà dels recursos disponibles, de l'àmbit a estudiar, de la tipologia de xarxa i del grau de precisió que es busqui, i s'ha de triar de forma que hi hagi un equilibri entre tots els factors.

De manera particular en modelització històrica, el desconeixement de línies obsoletes i/o variants de traçat antigues, de les quals no es sol disposar de dades en GIS, augmenta fins a un 5 % més, la variació final.

En segon lloc, per a l'indicador de fractalitat, la primera dificultat sorgeix de la operativitat matemàtica amb logaritmes, en aquelles corones en que no hi ha cap estació, comportant a dues possibles simplificacions: una que assumeix que la funcionalitat d'una corona amb una estació és igual a una que no en té cap, o bé sobredimensionar tot el càlcul sumant una estació a totes les corones.

Aquestes solucions s'han analitzat i es constata que, per a períodes primitius de les xarxes en que es caracteritzen per una expansió ràpida pel territori i poques estacions, el mètode més apropiat seria el primer. Igualment, per estats madurs de la xarxa, amb densificació dels nodes

d'accés o per a àmbits urbans, normalment no es té aquesta dificultat, o si més no es dona en poques corones, i per tant el primer mètode també sembla més adequat.

Seguidament s'ha analitzat la determinació de la superfície de càlcul, derivada de la limitació d'una ciutat de costa en front d'una ciutat d'interior. Mentre que en una ciutat com Madrid la superfície a considerar són corones circulars completes, en una ciutat com Barcelona, sorgeixen dues variants: calcular amb corones completes, o bé reduir-ne aquella part sobre el mar, on amb les concepcions actuals del sistema no hi pot haver xarxa. Es mostra en aquest cas es produeix una variació d'entre el 10 i el 15 % de l'indicador, que en termes qualitatius, equival a una diferència entre 15 i 30 anys d'evolució de la xarxa.

En una simplificació de càlcul de l'indicador, es planteja el càlcul en base a la longitud de xarxa en comptes del número d'estacions, obtenint diferències en períodes inicials del 300 % i decreixent fins al 100 % en períodes recents.

Degut a la magnitud de la variació obtinguda, s'ha plantejat la reducció de l'àmbit provincial d'estudi a un àmbit metropolità, considerant només els primers 25 km de radi, i a un àmbit urbà considerant-ne els 10 primers. Un cop analitzat, en l'àmbit metropolità s'han obtingut variacions inicials del 200 % i recents aproximadament del 30 %, mentre que per l'àmbit urbà, les variacions se situen per sota del 100 %, decreixent fins al 4 %.

A la vista dels resultats, la simplificació mostra una bondat d'ajust superior en períodes recents, i en àmbits amb forta maduració de la xarxa.

Passant a un tercer indicador, s'ha entrat a valorar l'indicador de cobertura on el principal factor diferenciador és el criteri a seguir per la limitació de la superfície de territori eficientment servida per la xarxa. A tals efectes s'han establert 4 mètodes com a progressives simplifications:

- Àrees d'influència a les estacions
- Àrees d'influència a les línies
- Àrees d'influència a les línies calculades de forma geomètrica
- Àrees d'influència delimitades pels límits municipals

Considerant com a mètode exacte el primer, i calculant les diferències dels altres tres en base a aquest, s'han obtingut variacions d'entre el 100 % i el 1200 %.

Els pitjors resultats s'obtenen amb el quart mètode, obtenint variacions d'entre el 600 % i el 1200 %. Alhora presenta una sèrie d'incongruències territorials en les que s'ha posat èmfasi, però la facilitat de càlcul fa que sigui un mètode habitualment utilitzat.

Per als dos mètodes mitjos, s'ha determinat que els factors importants són l'espaiament entre les estacions i el solapament de les àrees d'influència que es genera en àmbits urbans. En aquest sentit, l'espaiament mig s'ha avaluat, obtenint resultat de 4,2 km al període de 1870 i 2,3 km al darrer període, 2010.

De manera que el segon mètode s'aproxima millor al primer en períodes més recents i en àmbits amb més densitat de xarxa, i alhora el tercer s'aproxima millor amb aquest en períodes més antics i en àmbits interurbans, facilitant molt més els càlculs. Aquest fet, porta a obrir la possibilitat de considerar la complementarietat entre aquests dos mètodes, i realitzant un mètode combinat, un cop es considera vàlida la simplificació inicial.

Fent una valoració global dels darrers dos indicadors, resulta que les simplificacions adoptades depenen de factors que fan que continguin menys error en àmbits i períodes en que la xarxa està més desenvolupada, que no pas amb períodes inicials i per als quals són pensats amb el propòsit de contrarestar la manca de dades.

Continuant amb els indicadors de densitat i dotació, s'ha fet un anàlisi evolutiu que ha resultat en comportaments diferenciats d'aquests indicadors en el cas de Barcelona.

El càlcul també ha permès realitzar un anàlisi qualitatiu, encara més interessant, que ha posat de manifest com la xarxa de transport ferroviari, causa un efecte sobre el territori atraient cap a les línies existents noves centralitats que alhora propicien la obertura de noves estacions i nous trams de línia, en una interacció constant del sistema de transport amb el territori i les activitats que s'hi desenvolupen.

Per últim s'ha estudiat l'indicador d'accessibilitat. Un indicador complex i alhora molt recurrent per la qualitat de la seva definició conceptual, però que alhora requereix gran quantitat de simplificacions per tots els paràmetres que engloba. Encara més necessàries en modelització històrica, per la manca de dades operacionals.

Independentment de les simplificacions la capacitat de càlcul que requereix és molt elevada, i fa imprescindibles programaris d'alta complexitat per obtenir resultats prou acurats.

En aquest indicador s'ha apostat per la utilització de diversitat de programari i veure la versatilitat de cada un d'ells, alhora que s'han avaluat les diferències obtingudes en la simplificació d'alguns dels paràmetres, que intervenen en la complexa formulació de l'indicador.

Com a mètode exacte s'ha considerat el càlcul dels diferents itineraris amb *Google Maps*, i per al càlcul simplificat s'ha utilitzat el programari d'*ArcGIS* que, tot i considerar-ne les simplificacions, no ha deixat de ser complex.

Amb *Google Maps*, s'han incorporat al càlcul paràmetres com: el temps exacte de transbord; la velocitat dels trens en cada tram entre estacions, prenent els horaris de sortida i arribada a cada estació; i fins i tot, la definició de la trama urbana, per al càlcul dels itineraris d'accés i sortida, i la velocitat variable de l'usuari a peu, en funció del pendent del terreny, portant a matrius d'origen-destí asimètriques.

Amb tot la variació entre els mètodes ha estat del 16 %, en aquest cas a la baixa, per haver negligit alguns dels components de la formulació.

En termes particulars, l'omissió del temps de transbord pot resultar en variacions del temps mig d'accessibilitat de l'ordre del 15 % i la correcta elecció de les velocitats mitjanes en el model simplificat (dins d'un límit raonable), poden suposar variacions de l'entorn del 20 %.

Com a resum de l'estudi realitzat, es constata que en modelització històrica la manca de dades suposa un handicap important, que comporta obligatòriament simplificacions, a les quals s'hi sumen d'altres amb l'objectiu de facilitar alguns càlculs, fent que els resultats finals, calculats d'una manera o una altra, difereixin substancialment.

Ahora, s'ha vist que quan es projecten i construeixen les línies en primera instància s'uneixen els principals pols econòmics, socials i demogràfics existents. Un cop iniciada aquesta primera fase, la interrelació del territori amb la infraestructura fa que el desenvolupament social i comercial tendeixi a aprofitar les economies generades per la infraestructura, de manera que noves localitzacions es van situant a prop de les línies, al igual que el creixement urbà dels nuclis ja existents. Aquest procés provoca la necessitat d'obertura de noves estacions de manera que es maximitza l'aprofitament de la xarxa, que en termes de longitud pateix variacions escasses.

Aquest fet porta a la necessitat d'estudis de transport precisos, que siguin capaços de predir la utilitat futura de les xarxes i optimitzar les actuacions i els recursos invertits. Considerant les conclusions ja exposades, es posa de manifest la importància de reflexionar sobre els mètodes que s'utilitzaran en iniciar aquests estudis, per tal de no generar disfuncions en els resultats finals.

No obstant, un cop realitzada l'elecció, i deixant-ne constància explícita, les conclusions d'aquesta tesina, no invaliden cap metodologia de càlcul, sinó que només serveixen per posar ull crític i poder avaluar els resultats de forma correcta.

---

## 7 Referències Bibliogràfiques

Alcaide González, R. (2005): *El ferrocarril como elemento estructurador de la morfología urbana: El caso de Barcelona 1848-1900*. Scripta Nova, IX (194 (65)).

Alemany, J., Mestre, J. (1986): *Els transports a l'àrea de Barcelona: diligències, tramvies autobusos i metro*. Transportes de Barcelona (TB).

Alvarez-Palau, E. J., Hernández, M. & Tort, A. (2016): *Modelo morfológico de crecimiento urbano inducido por la infraestructura ferroviaria. Estudio de caso en 25 ciudades catalanas*. Scripta Nova, XX (527), 38p.

Alvarez-Palau, E. J., Aguilar, A. (2015): *Cálculo de la accesibilidad territorial ferroviaria mediante instrumentos de análisis de redes. Aplicación en Inglaterra y Gales, 1871–1931*. GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica, nº 15, pp. 75-104.

Alvarez-Palau, E. J., Franch, X. & Martí-Henneberg, J. (2013): *Evolution of the Territorial Coverage of the Railway Network and its Influence on Population Growth: The Case of England and Wales, 1871–1931*. Historical Methods, 46 (3), pp. 175–191.

Capel, H. (2007). *Ferrocarril, territorio y ciudades*. Biblio 3W, XII (717), 1–43.

Corbalán Gil, J. (1995). *Mollet del Vallès i "El Calderí"*. Notes, 9.

Editorial, E. (1975). *Enlaces Ferroviarios de Barcelona*. Informes de La Construcción, 27 (271).

Felis-Rota, M., Martí-Henneberg, J. & Mojica Gasol, L. (2012). *A GIS analysis of the evolution of the railway network and population densities in England and Wales, 1851-2000*. In EHA Annual Meeting, Vancouver. 16p.

García-López, M. Á. (2008). *Quince años de suburbanización en la Barcelona Metropolitana, ¿Se está dispersando la población?* Investigaciones Económicas, 32 (1), 53–86.

Herce, M., 2004. *Barcelona: Accessibility changes and metropolitan transformations*. Built Environment, 30, pp.127–138.

Julià, J. (2006). *Redes Metropolitanas*. Barcelona: Ed. Gustavo Gili.

Lichtberger, B. (2011). *Manual de vía*. Eurailpress, DVV Media Group. 10p.

Mandelbrot, B. (1975). *Les objets fractals*. Ed. Flammarion: París.

Morillas Torné, M. (2014). *Evolució del ferrocarril a Europa i la seva influència en els canvis en la distribució de la població. El cas d'Espanya, 1848 - 2010*. Universitat de Lleida. 290p.

Morillas-Torné, M. (2012). *Creation of a Geo-Spatial Database to Analyse Railways in Europe (1830-2010). A Historical GIS Approach*. Journal of Geographic Information System, 4, pp. 176–187.

Navas i Ferrer, T. (2012). *Crecimiento urbano, red de carreteras y tranvía eléctrico en el área de Barcelona*. In *I Simposio Internacional Globalización, innovación y construcción de redes técnicas urbanas en América y Europa, 1890-1930*. Universitat de Barcelona.

Olivé i Guilerà, F. (2000). *El ferrocarril a Catalunya. Un segle i mig de trens a l'entorn de Barcelona*. Finestrelles, (11).

Prat, J. (1994). *El sistema ferroviario en la configuración de la región de Barcelona*. Papers: Regió Metropolitana de Barcelona: Territori, estratègies, planejament, (16), 19–34.

Salas Suades, R. (2001). *Xarxes de transport col·lectiu i creixement urbà*. Tesina dirigida per Manuel Herce. ETSECCPB-UPC

Solanas, J., Alvarez-Palau, E. & Martí-Henneberg, J. (2015). *Estación ferroviaria y ciudades intermedias: Lectura Geo-espacial del crecimiento urbano mediante indicadores SIG vectoriales. El caso de Cataluña (1848-2010)*. GeoFocus, 16, pp. 253-280.

Subero Munilla, J. M. (2009). *Métodos de análisis de la eficacia espacial de las redes de transporte colectivo de infraestructura fija. Ensayo de indicadores de oferta*. Tesi doctoral dirigida per Manuel Herce. ETSECCPB-UPC.

Vinyes i Balbé, R. (2010). *La ocupación del subsuelo en una ciudad contemporánea: Barcelona*. Revista Iberoamericana de Urbanismo, (4), 41–52.

Pàgines web:

AMB: <http://www.amb.cat/s/home.html>

Centre Històric Miquel Biada: <http://www.biada.com>

EUROFERROVIARIOS: <http://euroferroviarios.net>

FERROPEDIA: <http://www.ferropedia.es>

FGC: <http://www.fgc.cat>

Hemeroteca LA VANGUARDIA:

<http://hemeroteca-paginas.lavanguardia.com/LVE07/HEM/1886/03/07/LVG18860307-004.pdf>  
<http://hemeroteca.lavanguardia.com/preview/1989/06/01/pagina-20/33068152/pdf.html>

HISTÒRIES MANRESANES: <http://historiesmanresanes.blogspot.com.es>



ICGC: <http://www.icgc.cat>

<http://betaportal.icgc.cat/canurb/cathistoric.html>

[http://betaserver.icgc.cat/visor/catalunya\\_ull\\_del\\_temps.html](http://betaserver.icgc.cat/visor/catalunya_ull_del_temps.html)

Institut fotogràfic de Catalunya:

<http://www.iefc.cat/documentacio/galeria-ferrocarrils-article-cast.php>

RENFE: <http://www.renfe.es/horarios/index.html>

SPANISH RAILWAY: <http://www.spanishrailway.com>

TMB: <http://www.tmb.cat>

TREN DEL CIMENT: <http://www.trendelciment.cat>

TRENSCAT: <http://www.trenscat.cat>

## Índex de Taules

Taula 3.2.1 Evolució de la xarxa ferroviària de Barcelona: estacions i longitud de línies.....	35
Taula 4.1.1 Revisió del criteri de mesura de la xarxa de metro, adequant-lo a criteris de servei.....	39
Taula 5.1.1 Longitud de xarxa .....	56
Taula 5.1.2 Longitud de xarxa a cada període en km i variació HGISE vs Reconstrucció pròpia.....	57
Taula 5.2.1 Resultats per a l'indicador de fractalitat, considerant número d'estacions i $\log(0) = 0$ , amb corones completes.....	59
Taula 5.2.2 Resultats per a l'indicador de fractalitat, considerant número d'estacions i $n+1$ estacions, amb corones completes.....	59
Taula 5.2.3 Resultats per a l'indicador de fractalitat, considerant número d'estacions i $\log(0) = 0$ , amb corones reduïdes.....	60
Taula 5.2.4 Resultats per a l'indicador de fractalitat, considerant número d'estacions i $n+1$ estacions, amb corones reduïdes.....	60
Taula 5.2.5 Comparació de les superfícies possibles per al càlcul de la fractalitat.....	61
Taula 5.2.6 Anàlisi de les corones amb 0 estacions.....	62
Taula 5.2.7 Evolució de l'indicador de fractalitat, considerant longitud de línies.....	63
Taula 5.2.8 Comparació de mètodes de càlcul de l'indicador de fractalitat en àmbit metropolità.....	65
Taula 5.2.9 Comparació de mètodes de càlcul de l'indicador de fractalitat en àmbit urbà.....	66
Taula 5.3.1 Càlcul de la superfície del límit provincial de Barcelona.....	67
Taula 5.3.2 Resultats de cobertura del ferrocarril en base a les àrees d'influència de les estacions.....	68
Taula 5.3.3 Resultats de cobertura del conjunt ferrocarril i metro en base a les àrees d'influència de les estacions.....	68
Taula 5.3.4 Cobertura aportada pel metro a la xarxa global.....	69
Taula 5.3.5 Resultats de cobertura del conjunt ferrocarril i metro en base a les àrees d'influència de les línies.....	70
Taula 5.3.6 Resultats de cobertura del conjunt ferrocarril i metro en base a les àrees d'influència geomètriques a les línies.....	71
Taula 5.3.7 Resultats de cobertura del conjunt ferrocarril i metro en base als límits municipals.....	72
Taula 5.3.8 Relació entre superfície coberta aproximada i real.....	74
Taula 5.3.9 Càlcul de l'evolució de l'espaiament mig entre estacions.....	74
Taula 5.3.10 Comparació entre els mètodes 1 i 2 de cobertura, per a àmbit urbà.....	76
Taula 5.3.11 Comparació entre els mètodes 1 i 2 de cobertura, per a àmbit metropolità.....	76
Taula 5.3.12 Comparació entre els mètodes 2 i 3 de cobertura, excloent l'àmbit urbà.....	77
Taula 5.3.13 Comparació entre els mètodes 2 i 3 de cobertura, excloent l'àmbit urbà i metropolità.....	78
Taula 5.5.1 Matriu origen – destí del mètode complex accessibilitat.....	85
Taula 5.5.2 Matriu origen – destí del mètode simplificat d'accessibilitat.....	86
Taula 5.5.3 Comparació del temps mig d'accés a cada node.....	87
Taula 5.5.4 Comparació Índex Global d'Accessibilitat de la xarxa.....	87
Taula 5.5.5 Comparació del temps mig d'accés a cada node de l'àmbit reduït.....	89

Taula 5.5.6 Comparació Índex Global d'Accessibilitat de la xarxa reduïda. ....	89
Taula 5.5.7 Variació per la simplificació, en funció de les velocitats. ....	90
Taula 5.5.8 Variació per la simplificació, en funció de les velocitats, per a la xarxa reduïda. ....	90
Taula 5.5.9 Variació causada per la simplificació del temps de transbordament. ....	90

## Índex de Figures

Figura 2.1.1 Plànol de Barcelona al 1856 amb els accessos de les línies ferroviàries existents. ....	14
Figura 2.1.2 Configuració de les línies ferroviàries a la ciutat de Barcelona al 1906. ....	17
Figura 2.1.3 Esquema de la xarxa antiga de la línia de Catalans per trams i dates d'inauguració. ....	21
Figura 2.1.4 Esquema de la xarxa antiga de la línia del Vallès per trams i dates d'inauguració. ....	22
Figura 2.1.5 Configuració de la xarxa de metro de Barcelona al 2010. ....	27
Figura 2.1.6 Configuració futura de la xarxa de metro de Barcelona. ....	28
Figura 3.1.1 Evolució de la població a la província de Barcelona en M d'habitants. ....	32
Figura 3.2.1 Evolució de la xarxa ferroviària de Barcelona: estacions i longitud de línies. ....	35
Figura 4.2.1 Representació del conjunt de Mandelbrot, com a exemple de formes fractals. ....	40
Figura 4.2.2 Identificació de formes fractals en la natura. ....	41
Figura 4.2.3 Representació de corones circulars completes i reduïdes. ....	44
Figura 4.3.1 Detall de càlcul de la cobertura amb <i>buffers</i> a les estacions. ....	47
Figura 4.3.2 Detall de càlcul de la cobertura amb <i>buffers</i> a les línies. ....	47
Figura 4.3.3 Detall de càlcul de la cobertura com a variable dicotòmica en base als límits municipals. ....	48
Figura 4.5.1 Cicle de temps de viatge. ....	53
Figura 4.5.2 Evolució històrica de la velocitat màxima i la càrrega per eix dels trens de passatgers i de mercaderies. ....	53
Figura 5.1.1 Longitud de xarxa segons HGISE i Reconstrucció pròpia a escala 1:5.000 en base a l'ICGC. ....	57
Figura 5.1.2 Evolució de la longitud de la xarxa ferroviària. ....	58
Figura 5.2.1 Evolució de l'indicador de fractalitat, considerant número d'estacions i $\log(0) = 0$ . ....	60
Figura 5.2.2 Evolució de l'indicador de fractalitat, considerant número d'estacions i $n+1$ estacions. ....	61
Figura 5.2.3 Evolució de l'indicador de fractalitat considerant número d'estacions, amb corones reduïdes. ....	62
Figura 5.2.4 Comparatiu indicador fractalitat. ....	64
Figura 5.2.5 Comparació de mètodes de càlcul de l'indicador de fractalitat en àmbit metropolità. ....	65
Figura 5.2.6 Comparació de mètodes de càlcul de l'indicador de fractalitat en àmbit urbà. ....	66
Figura 5.3.1 Plànol de superfície total coberta a partir d'àrees d'influència de les estacions. ....	67
Figura 5.3.2 Evolució de la cobertura en base a les àrees d'influència de les estacions. ....	68
Figura 5.3.3 Plànol de superfície total coberta a partir d'àrees d'influència a les línies. ....	70
Figura 5.3.4 Superfície total coberta a partir dels límits municipals. ....	71
Figura 5.3.5 Detalls de cobertura en base als límits municipals. ....	72
Figura 5.3.6 Comparatiu dels resultats de cobertura segons les simplificacions introduïdes. ....	73
Figura 5.3.7 Evolució de la variació entre els mètodes 2 i 3 de cobertura. ....	75
Figura 5.3.8 Evolució de l'error entre els mètodes 1 i 2 de cobertura, per àmbits urbans i metropolitans. ....	77
Figura 5.3.9 Evolució de l'error entre els mètodes 2 i 3 de cobertura, exclouent àmbits urbans i metropolitans. ....	78
Figura 5.4.1 Evolució de la dotació i la densitat. ....	79
Figura 5.4.2 Distribució de la població al 1890. ....	80
Figura 5.4.3 Distribució de la població al 1990. ....	80
Figura 5.5.1 Representació de la xarxa considerada per al càlcul de l'accessibilitat. ....	83
Figura 5.5.2 Exemple de càlcul amb <i>Google Maps</i> . ....	84

**ANNEXOS**

## ANNEX 1 Plànols Fase de Reconstrucció

La raó de ser del present annex, és representar la reconstrucció realitzada de la xarxa ferroviària, amb totes les seves línies i estacions operatives, sobre la que es realitzen els càlculs posteriors.

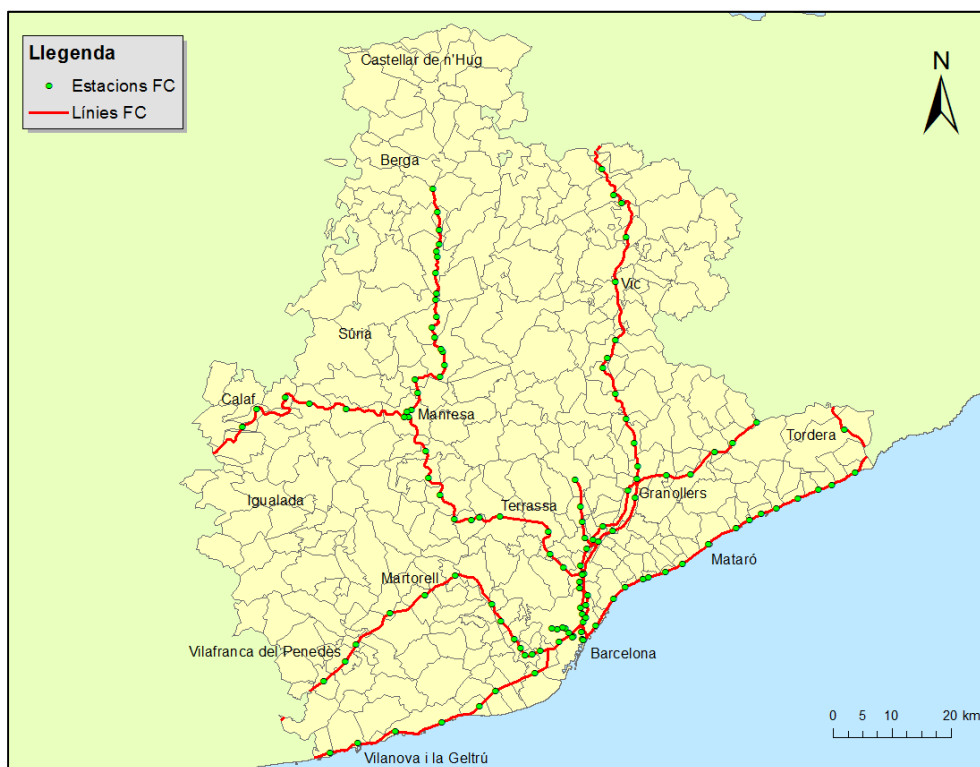
En primer lloc es presenta la xarxa de via ampla i via estreta, per a cada un dels 9 períodes definits, i en segon lloc la xarxa de metro de Barcelona per als períodes a partir de 1930, ja que prèviament no existia.



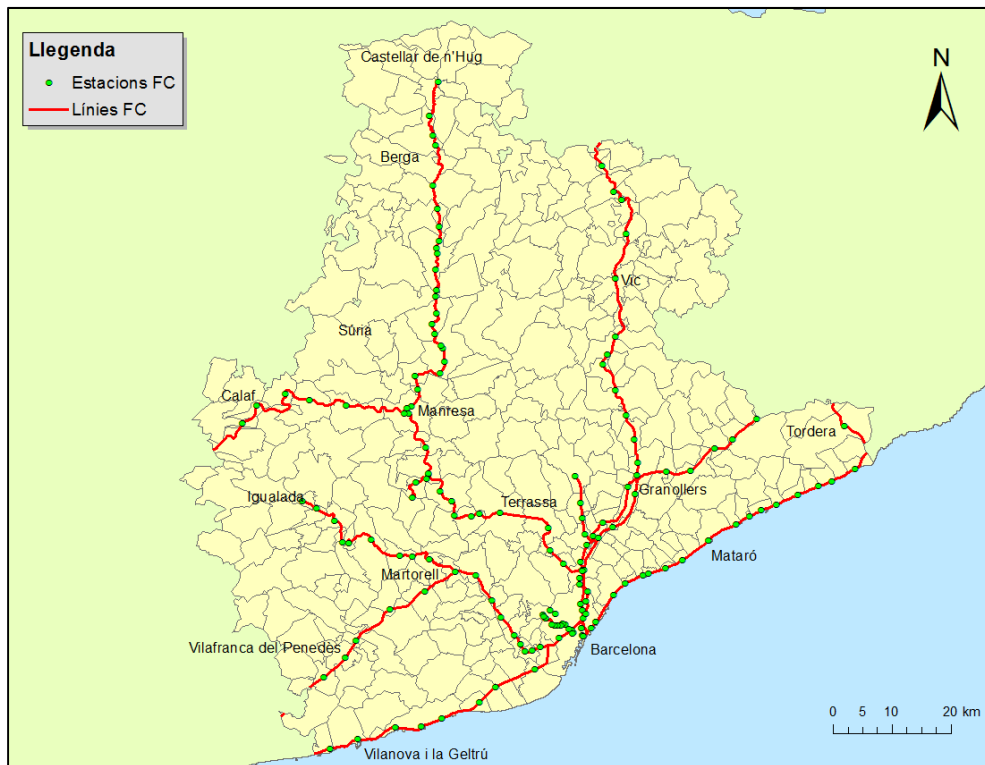
Xarxa de Ferrocarril al 1850



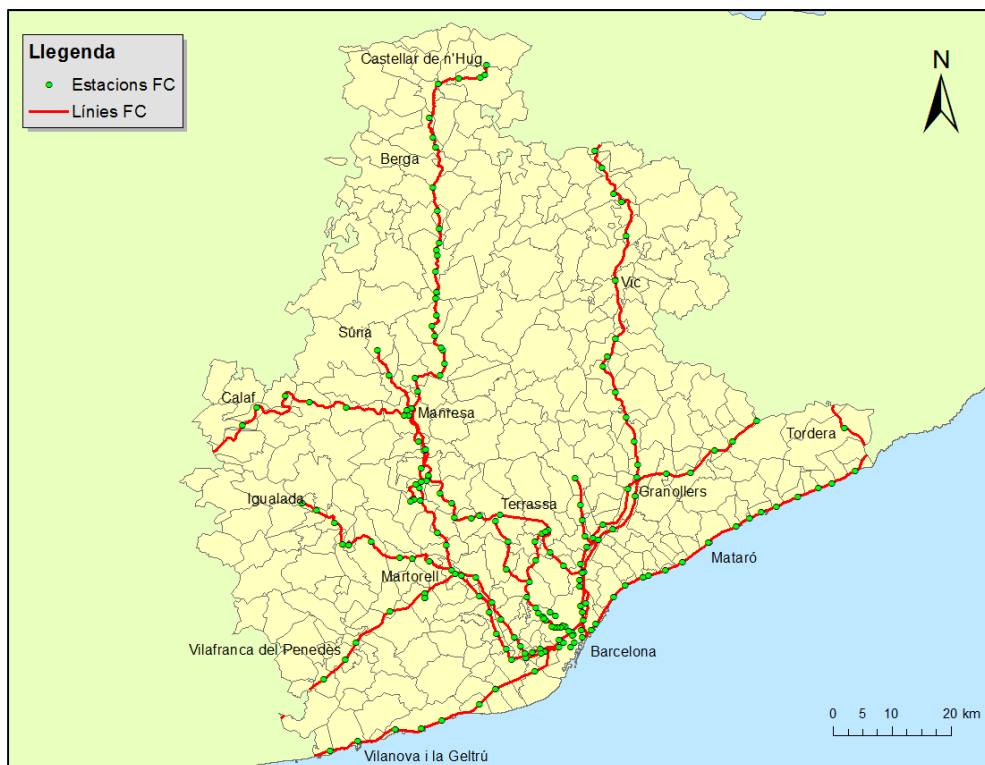
Xarxa de Ferrocarril al 1870



Xarxa de Ferrocarril al 1890

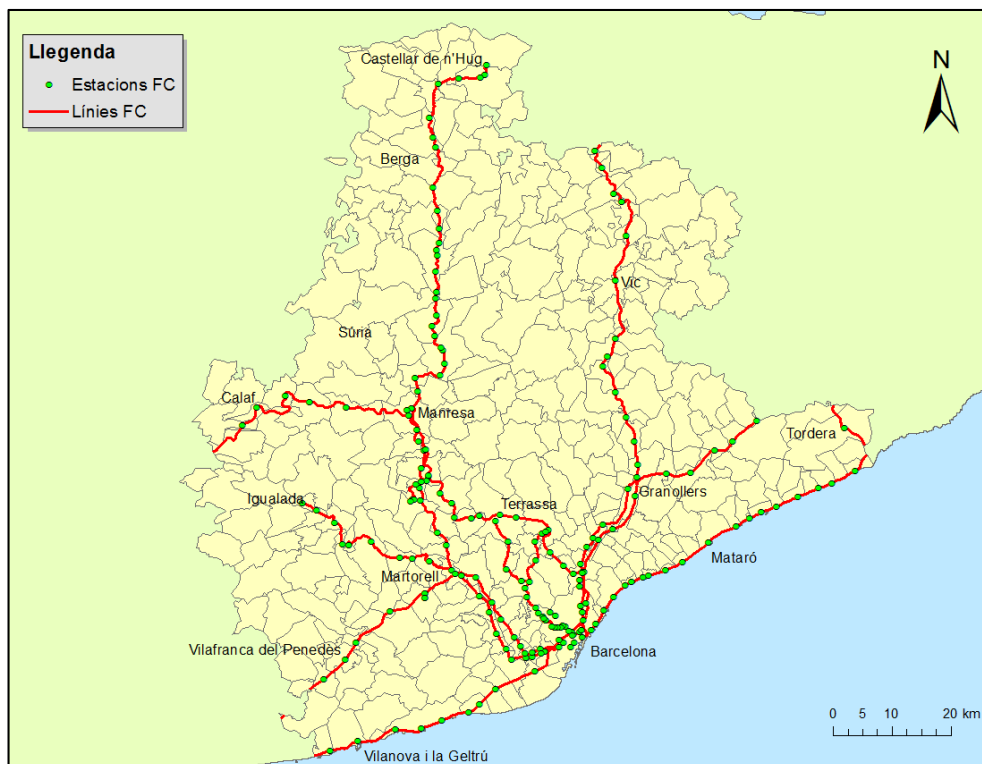


Xarxa de Ferrocarril al 1910

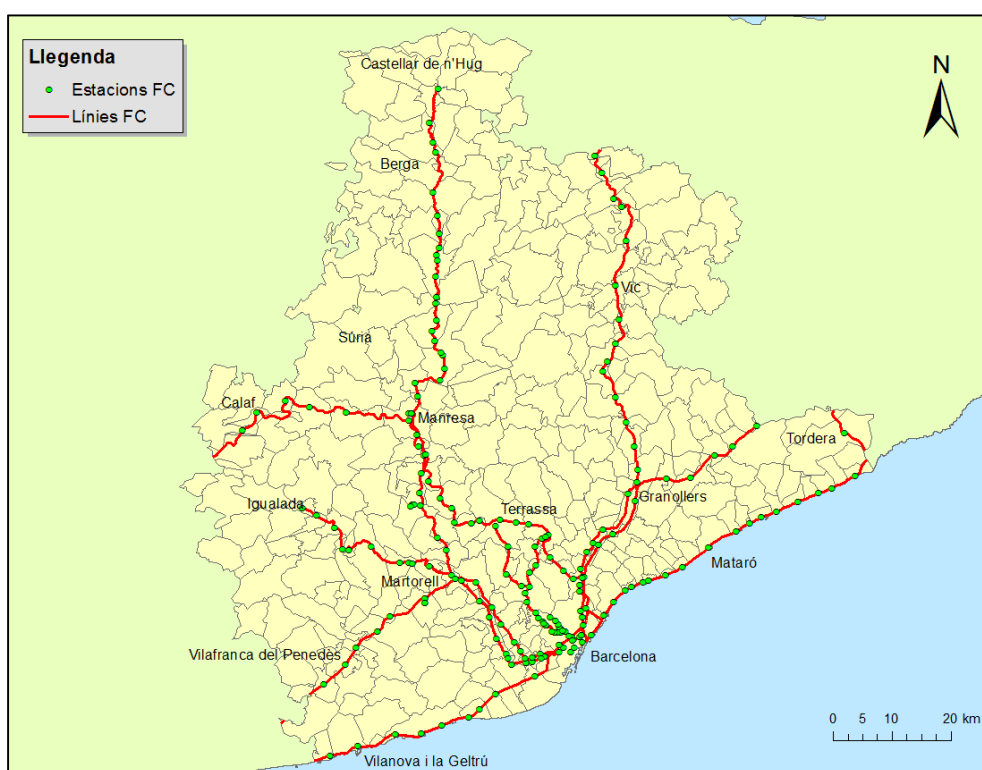


Xarxa de Ferrocarril al 1930

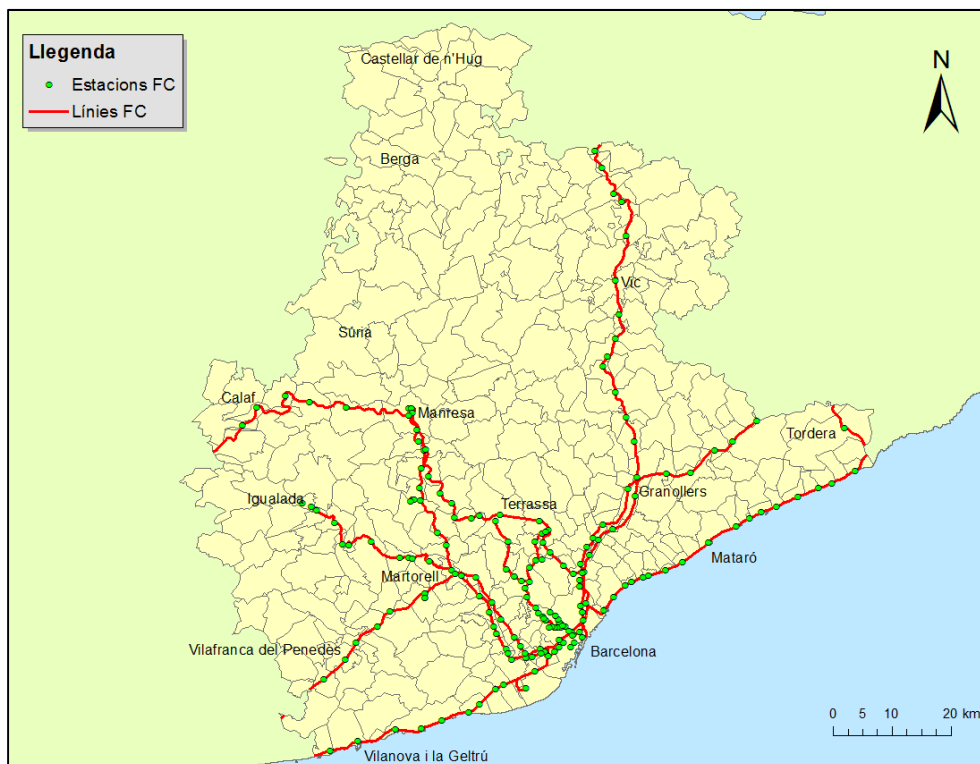




Xarxa de Ferrocarril al 1950



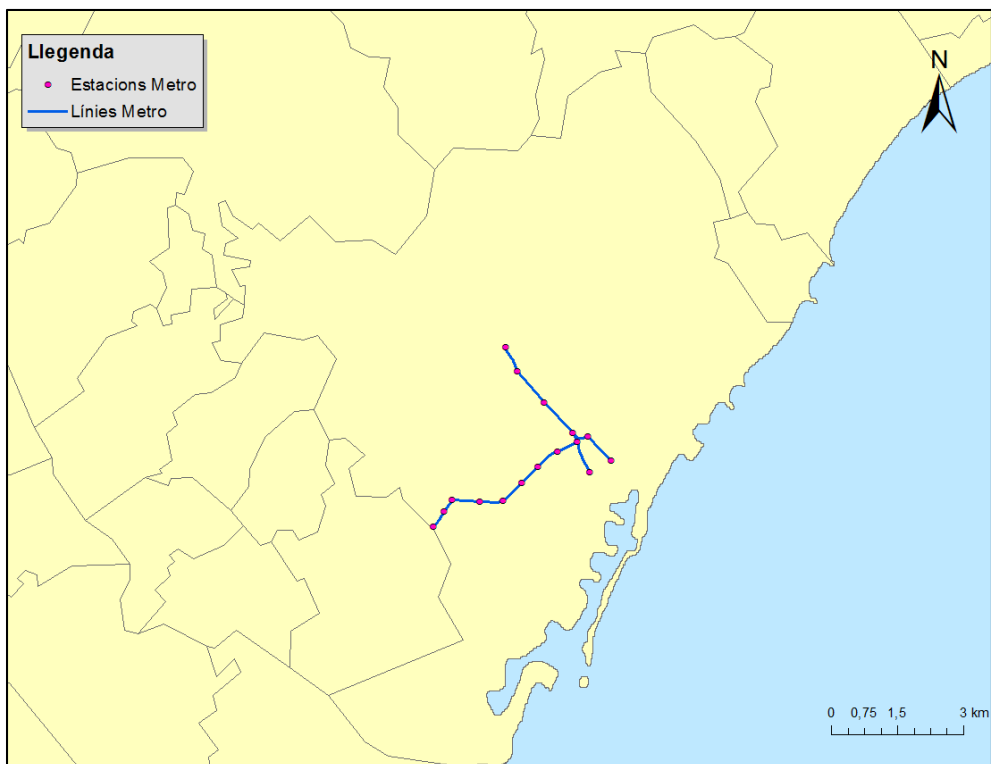
Xarxa de Ferrocarril al 1970



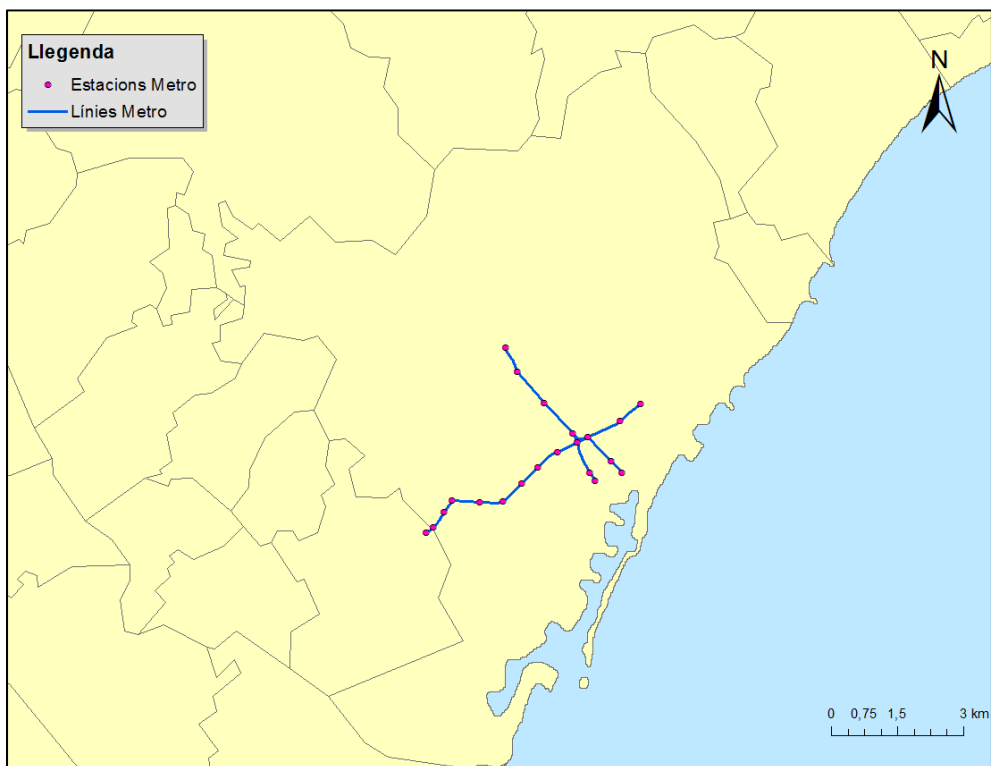
Xarxa de Ferrocarril al 1990



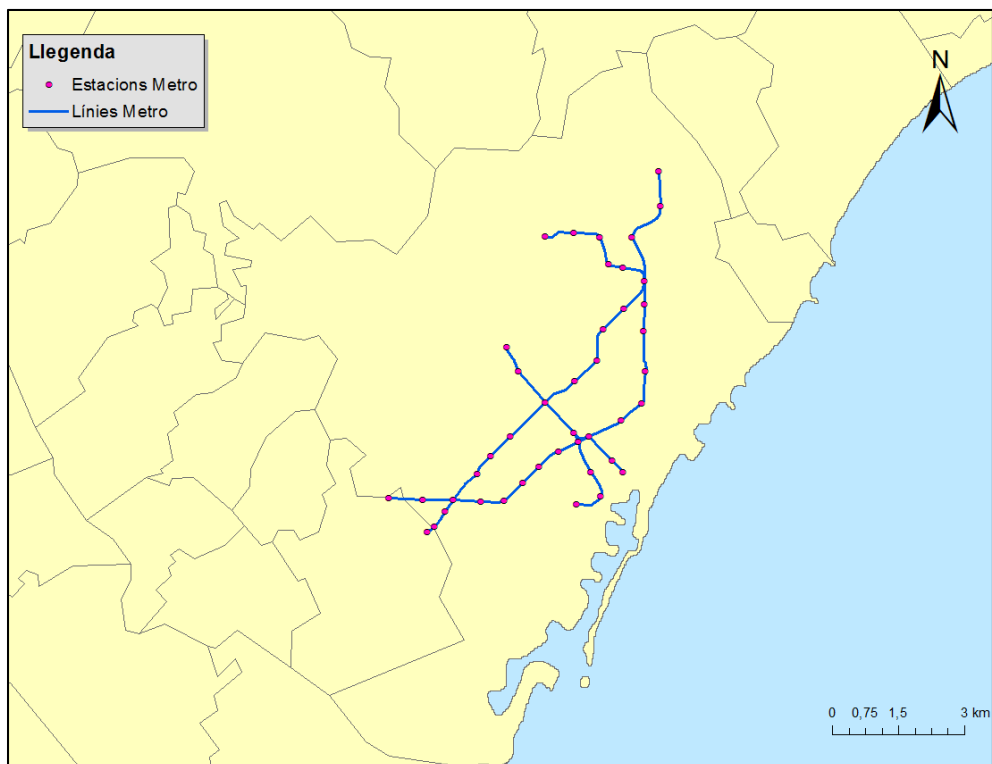
Xarxa de Ferrocarril al 2010



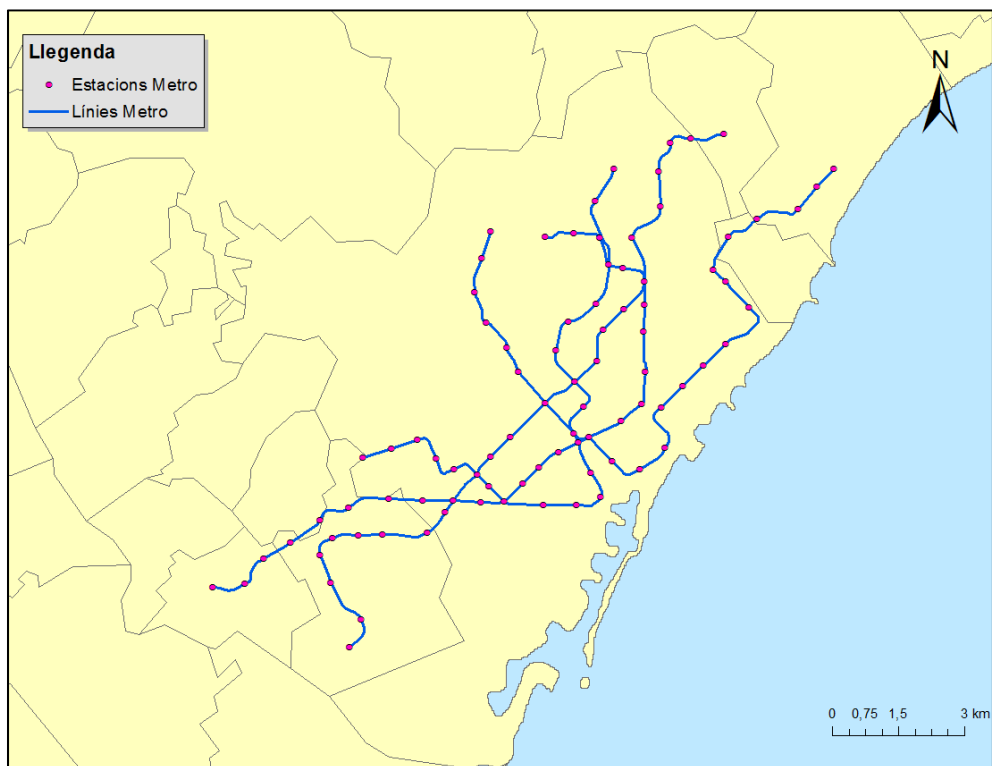
Xarxa del metro de Barcelona al 1930



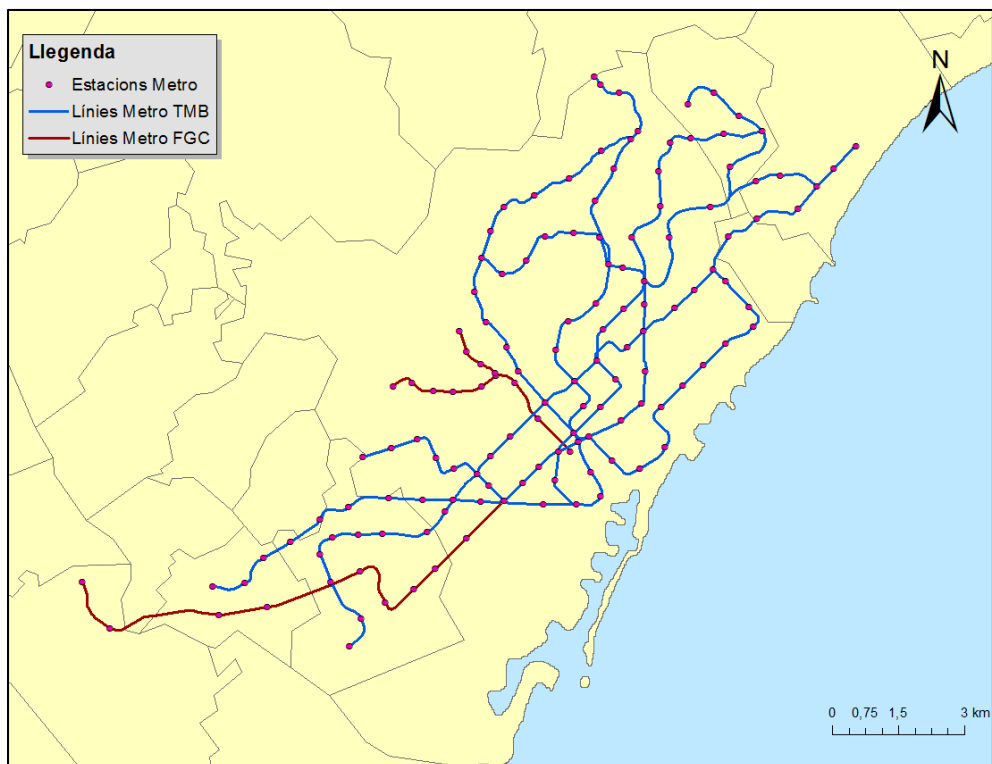
Xarxa del metro de Barcelona al 1950



Xarxa del metro de Barcelona al 1970



Xarxa del metro de Barcelona al 1990



Xarxa del metro de Barcelona al 2010

## ANNEX 2 Plànols Fase Anàlisi

La raó de ser del present annex, és servir de recopilatori de tots els plànols elaborats durant l'estudi, i sobre els quals es basen els càlculs de tots els indicadors.

Les sèries de plànols estan ordenades en relació als apartats del capítol 5 i en cada una d'elles es mostra la xarxa en cadascun dels 9 períodes definits.



Resultats 5.1. Km de xarxa període 1



Resultats 5.1. Km de xarxa període 2



Resultats 5.1. Km de xarxa període 3



Resultats 5.1. Km de xarxa període 4



Resultats 5.1. Km de xarxa període 5





Resultats 5.1. Km de xarxa període 6



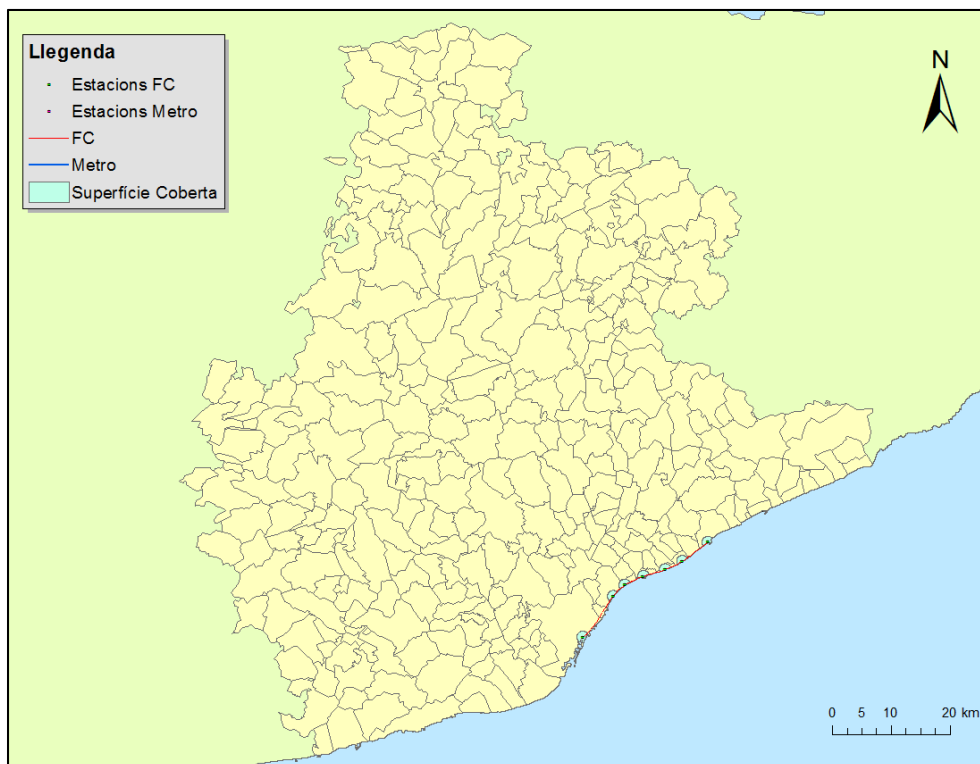
Resultats 5.1. Km de xarxa període 7



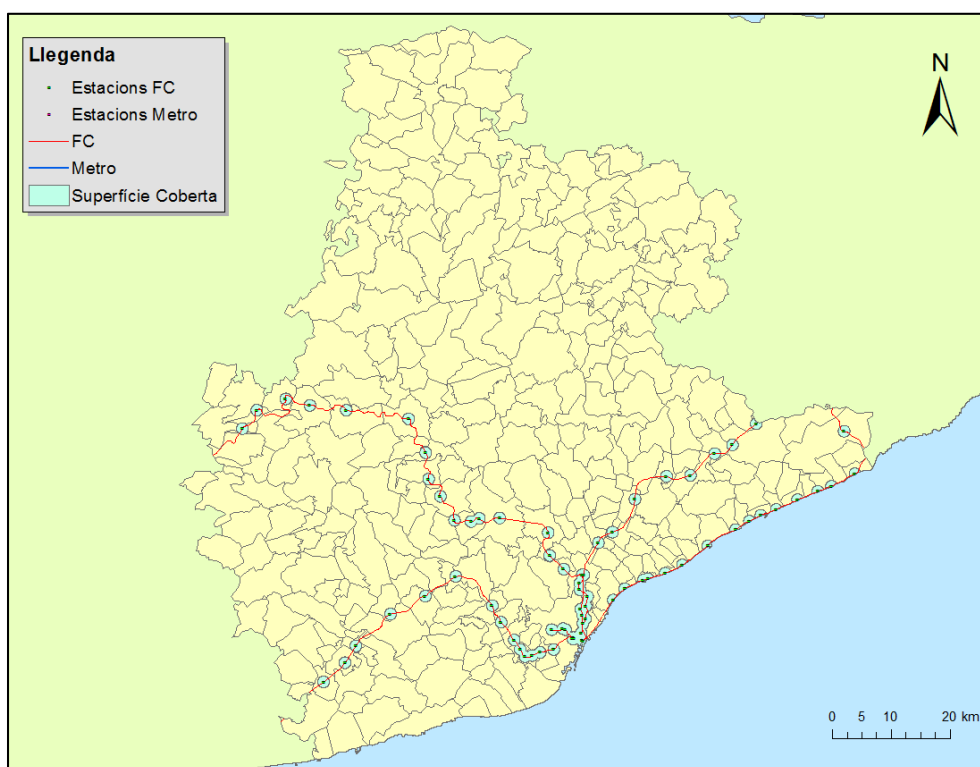
Resultats 5.1. Km de xarxa període 8



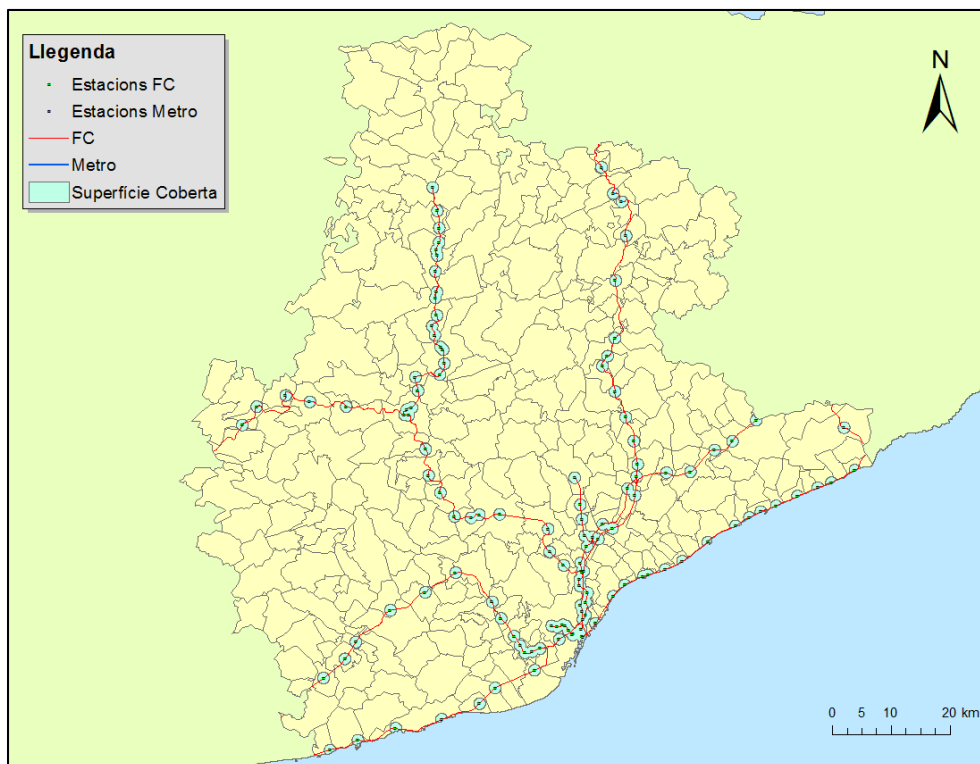
Resultats 5.1. Km de xarxa període 9



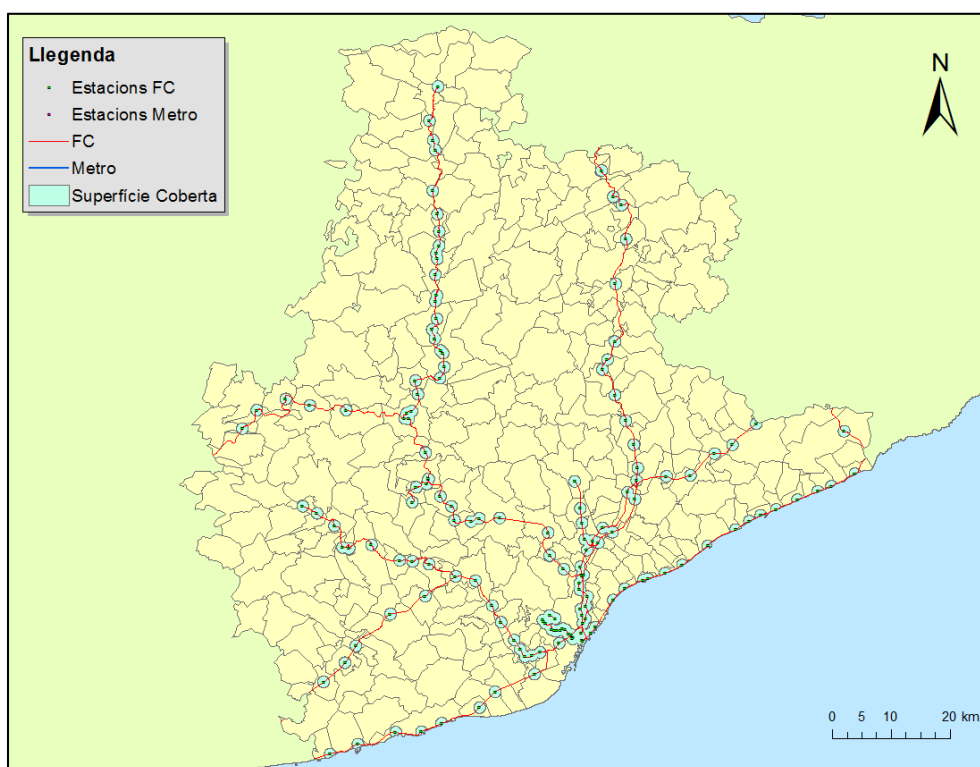
Resultats 5.2. Cobertura mètode 1, període 1



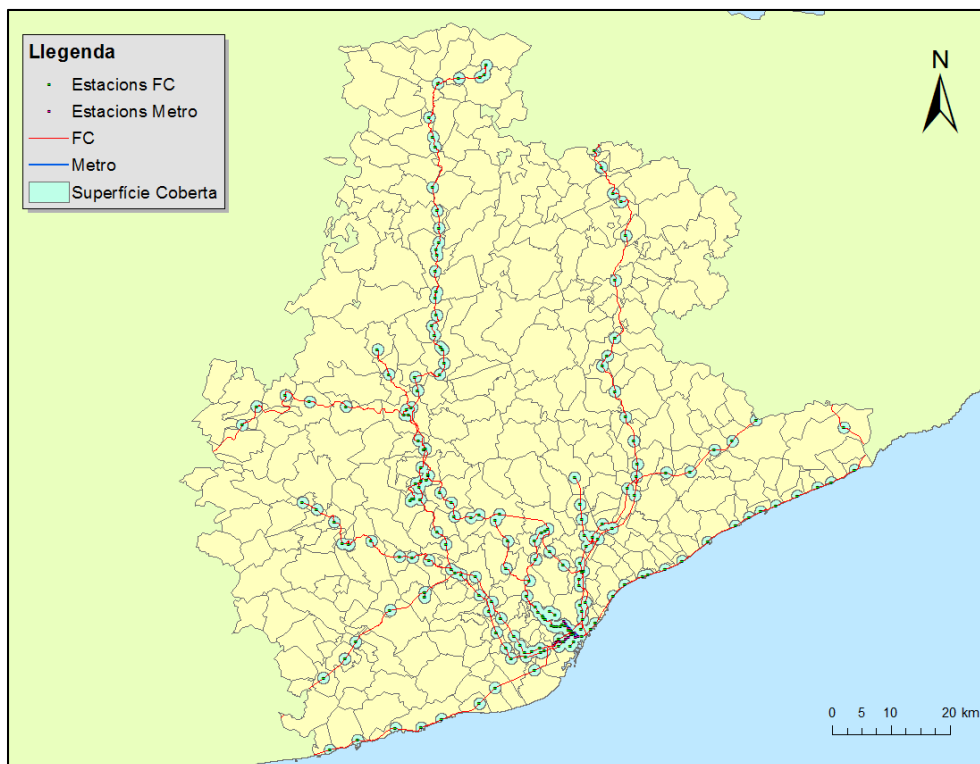
Resultats 5.2. Cobertura mètode 1, període 2



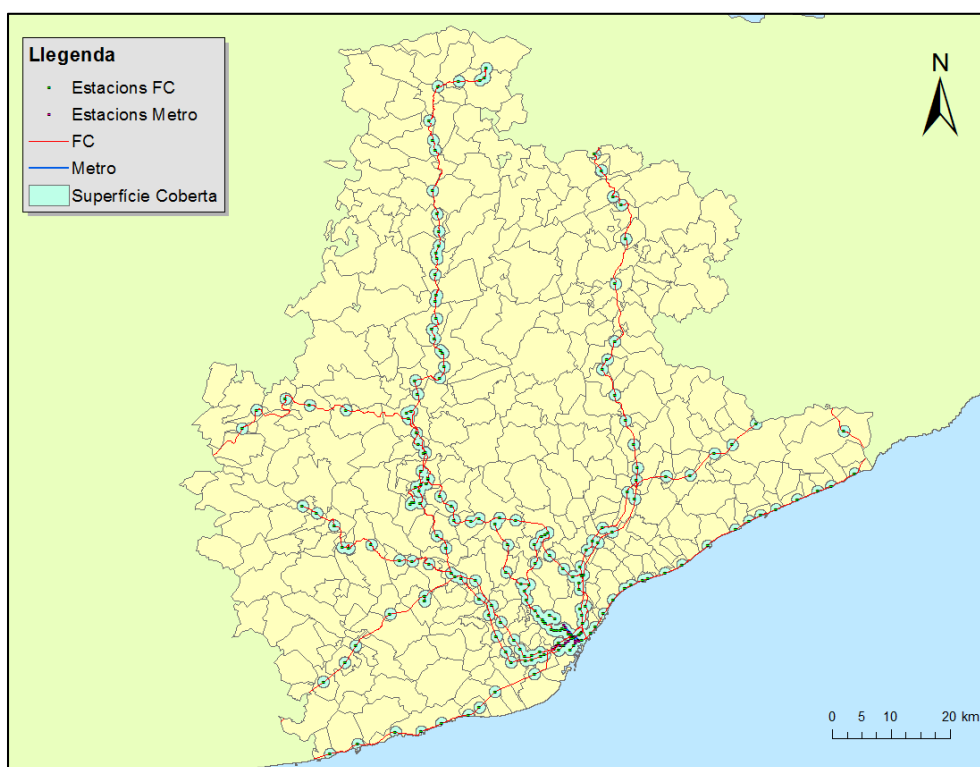
Resultats 5.2. Cobertura mètode 1, període 3



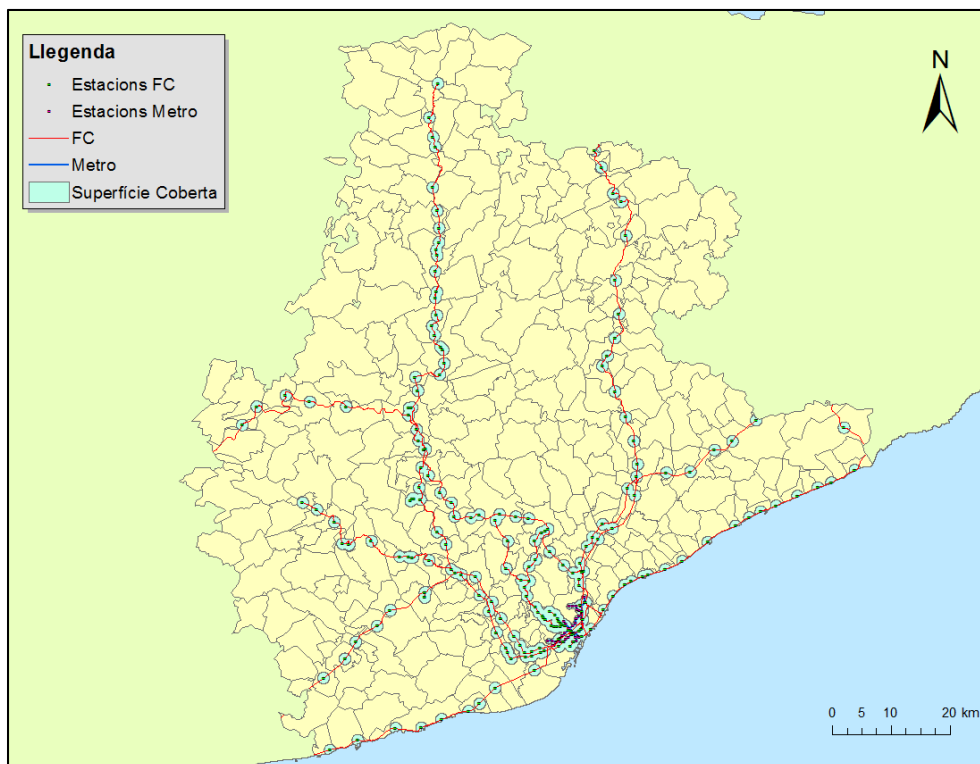
Resultats 5.2. Cobertura mètode 1, període 4



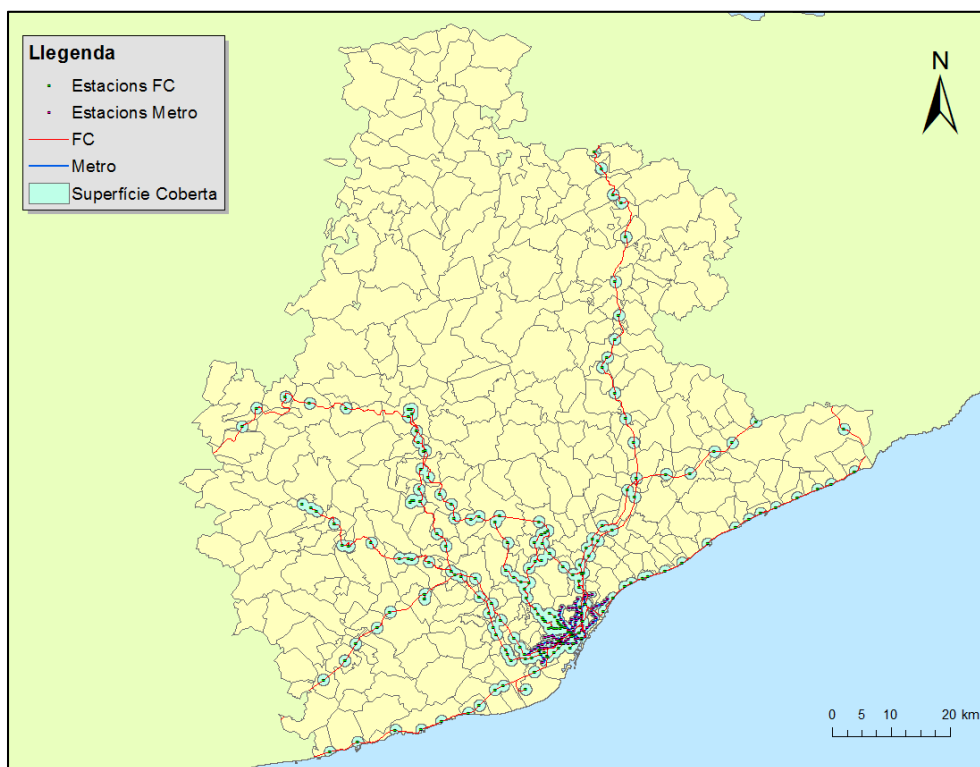
Resultats 5.2. Cobertura mètode 1, període 5



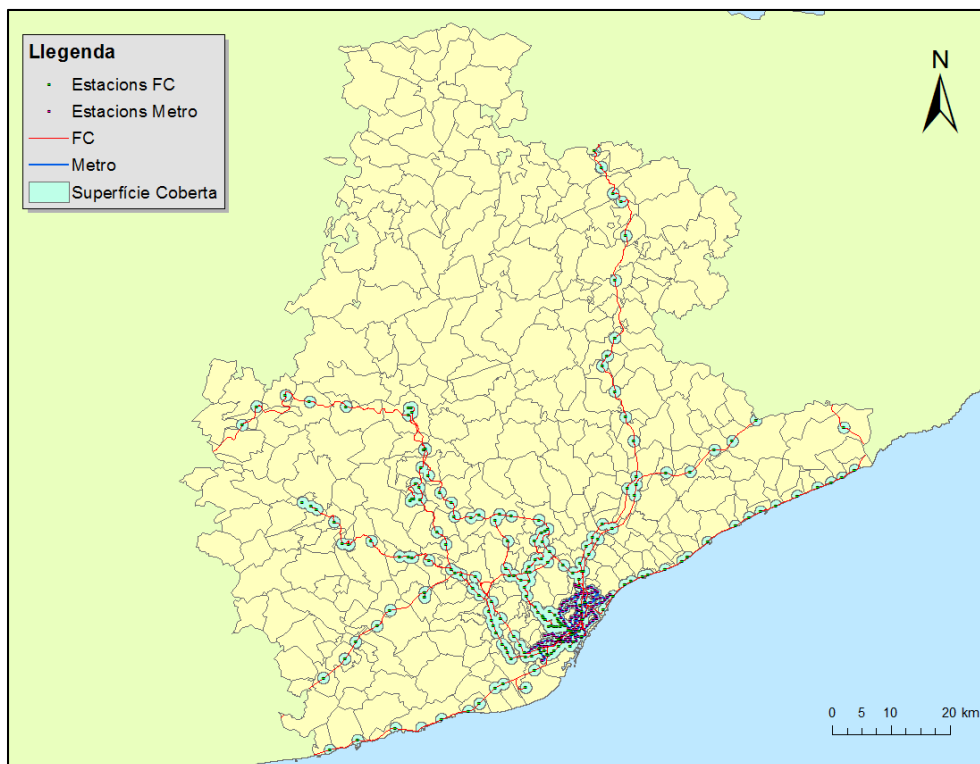
Resultats 5.2. Cobertura mètode 1, període 6



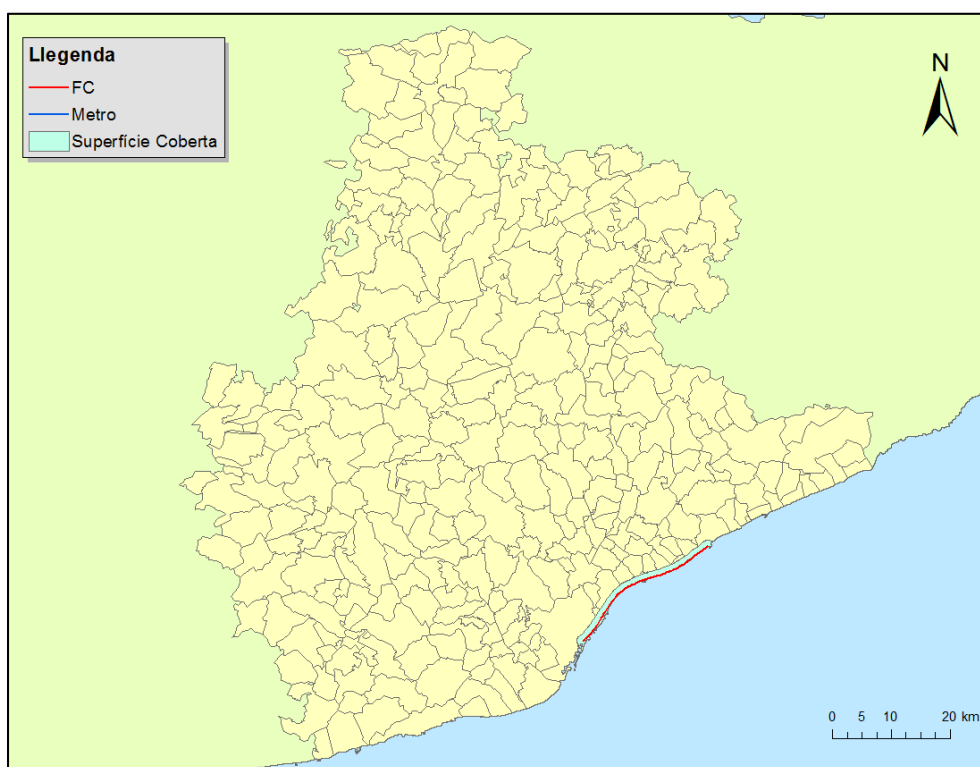
Resultats 5.2. Cobertura mètode 1, període 7



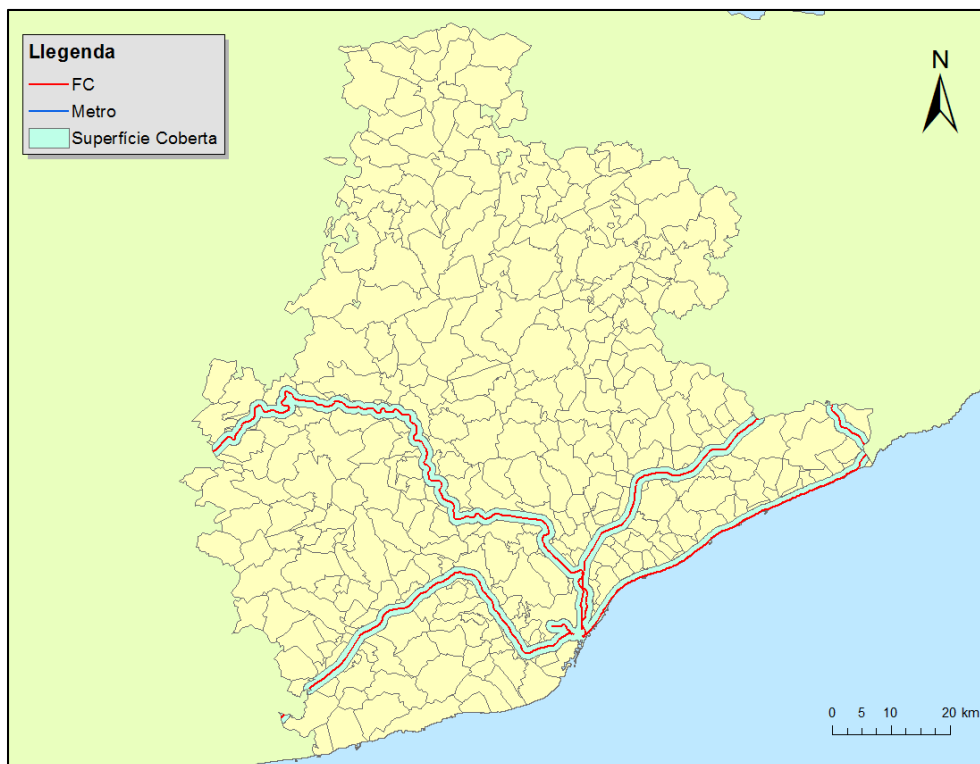
Resultats 5.2. Cobertura mètode 1, període 8



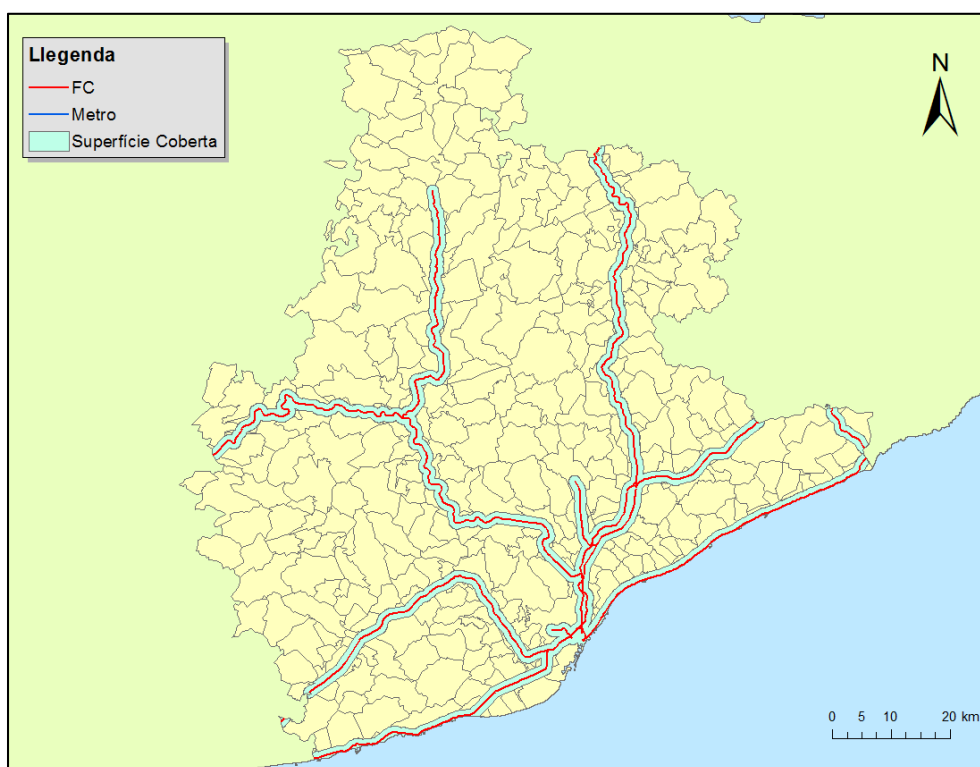
Resultats 5.2. Cobertura mètode 1, període 9



Resultats 5.2. Cobertura mètode 2, període 1

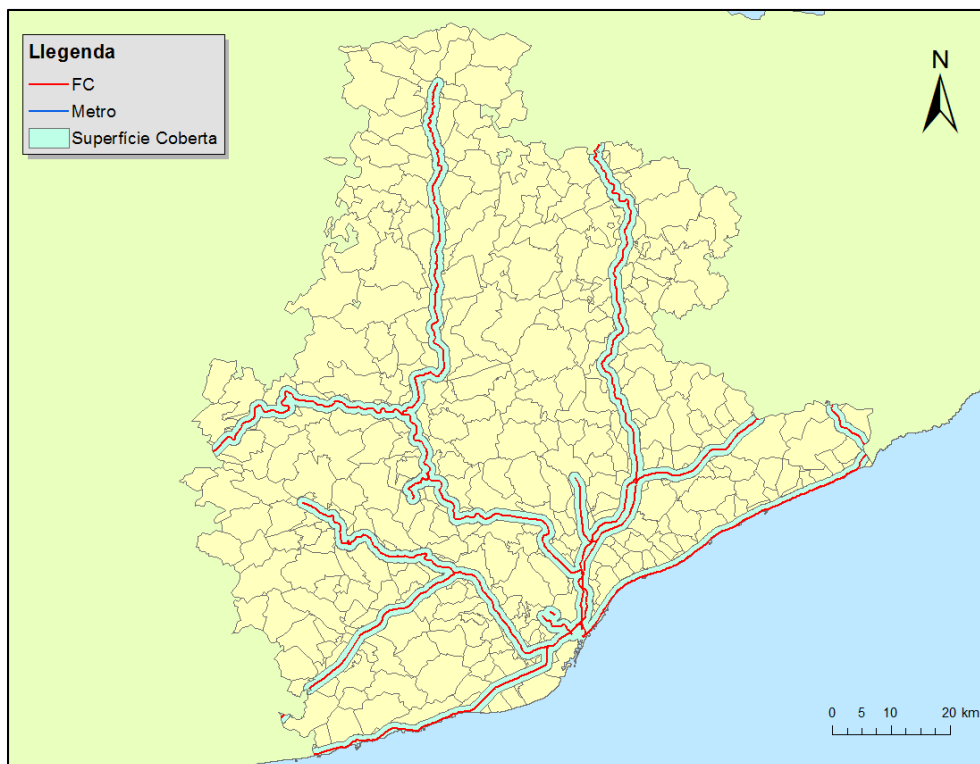


Resultats 5.2. Cobertura mètode 2, període 2

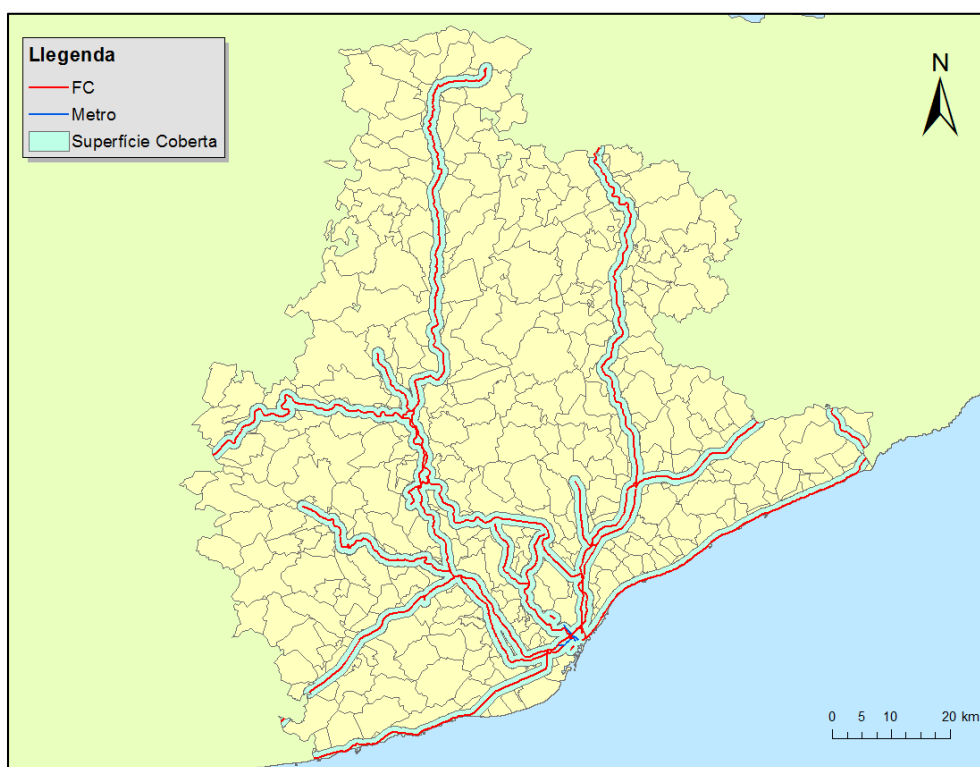


Resultats 5.2. Cobertura mètode 2, període 3

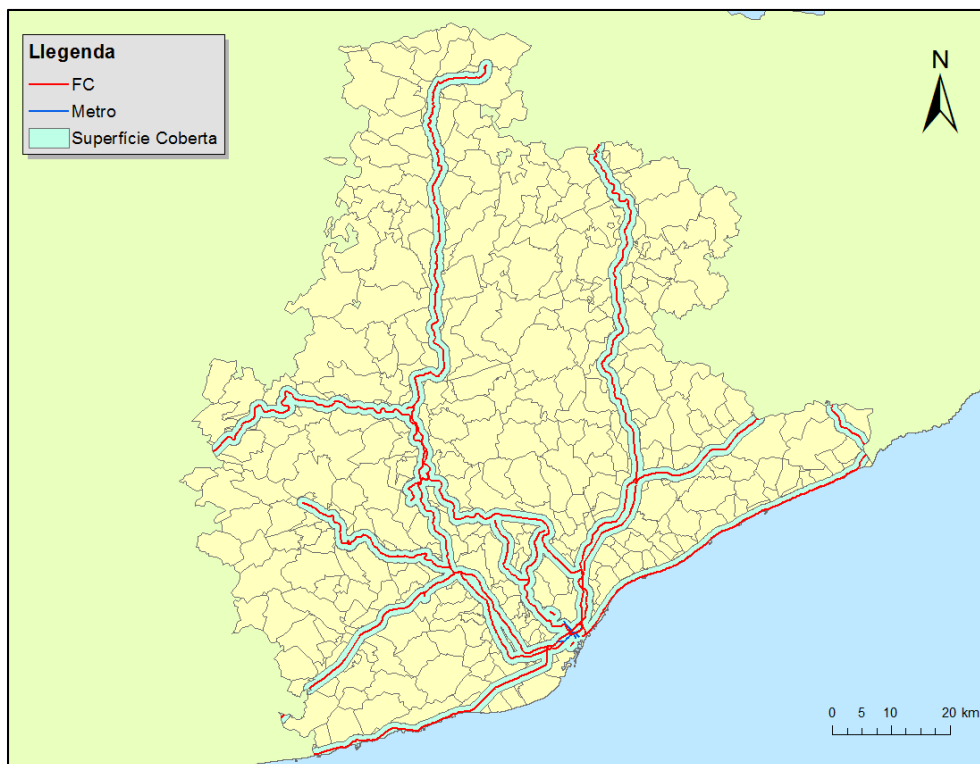




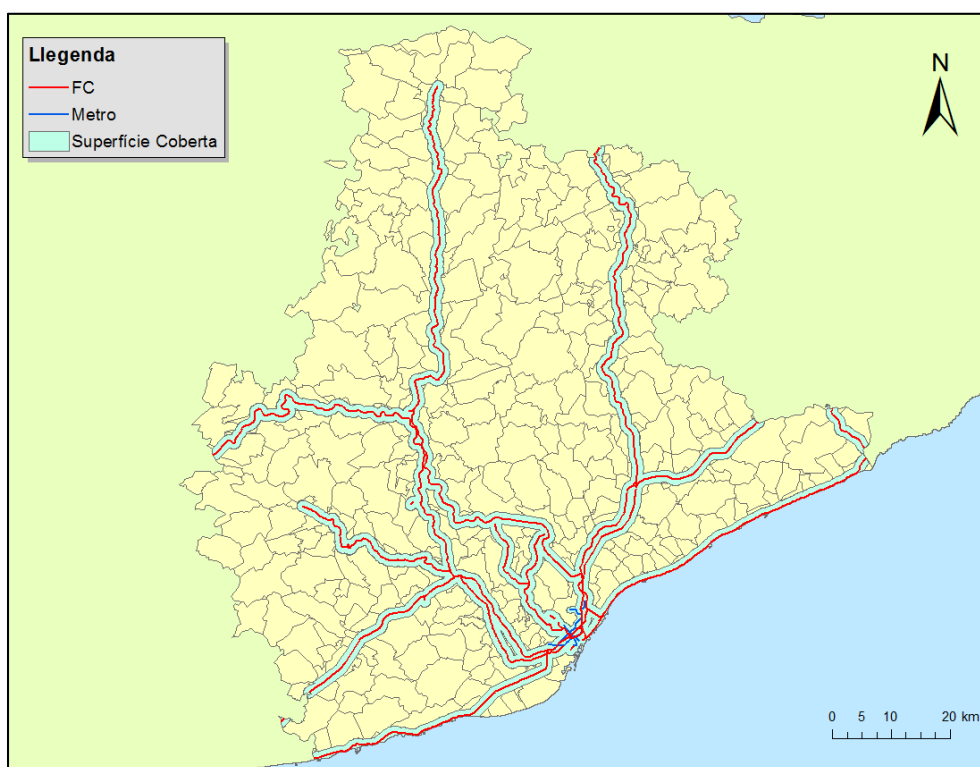
Resultats 5.2. Cobertura mètode 2, període 4



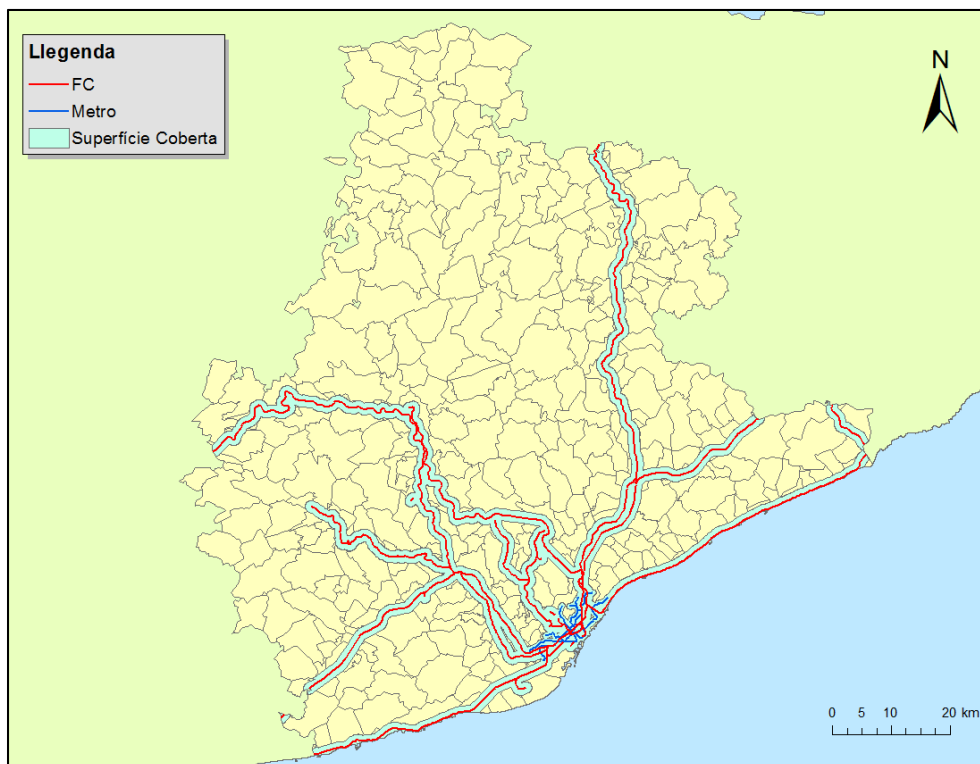
Resultats 5.2. Cobertura mètode 2, període 5



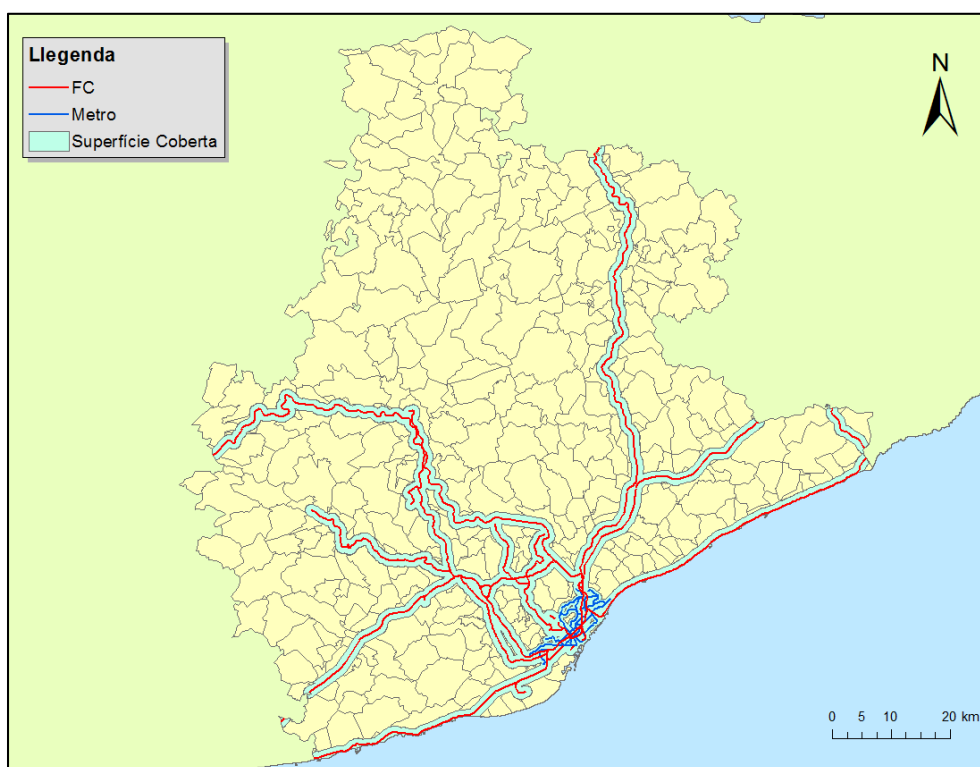
Resultats 5.2. Cobertura mètode 2, període 6



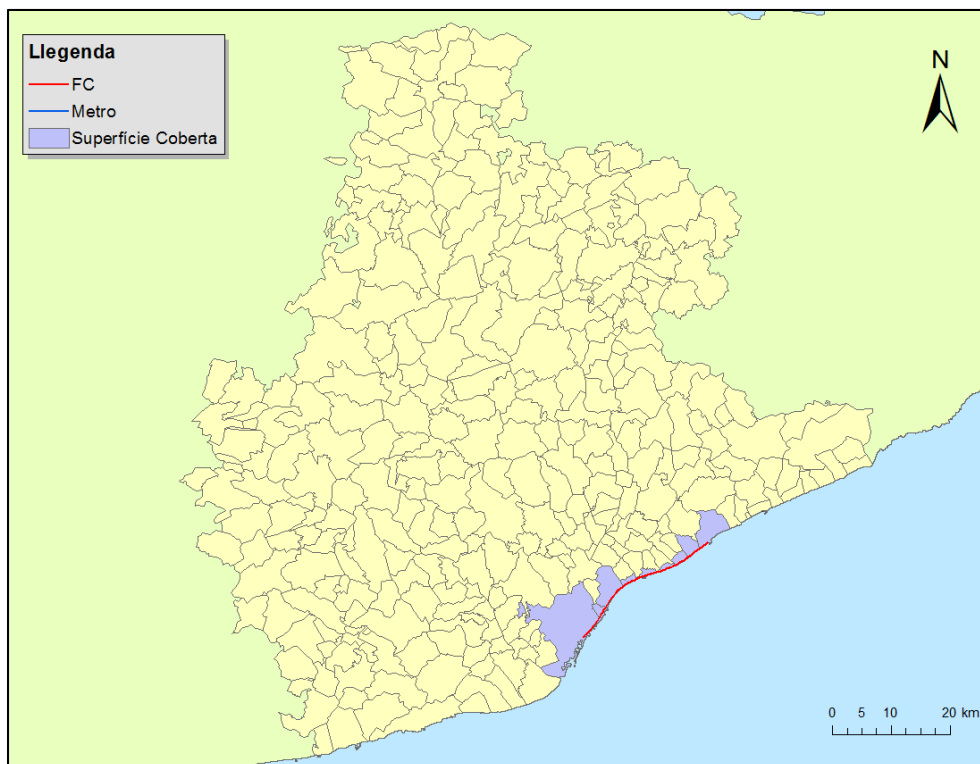
Resultats 5.2. Cobertura mètode 2, període 7



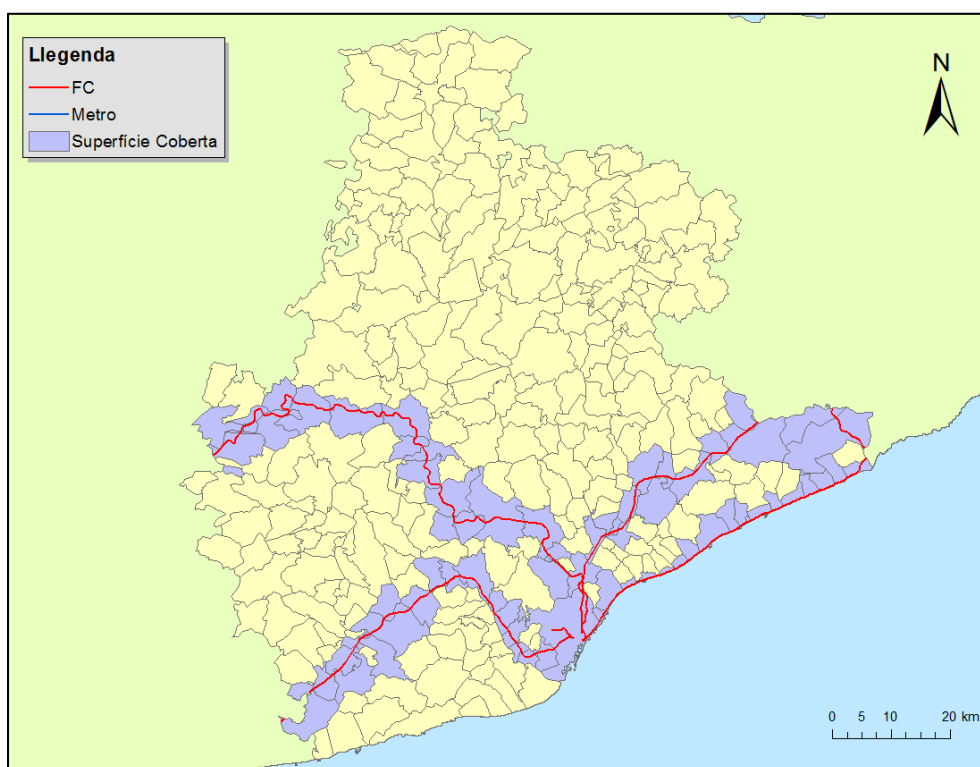
Resultats 5.2. Cobertura mètode 2, període 8



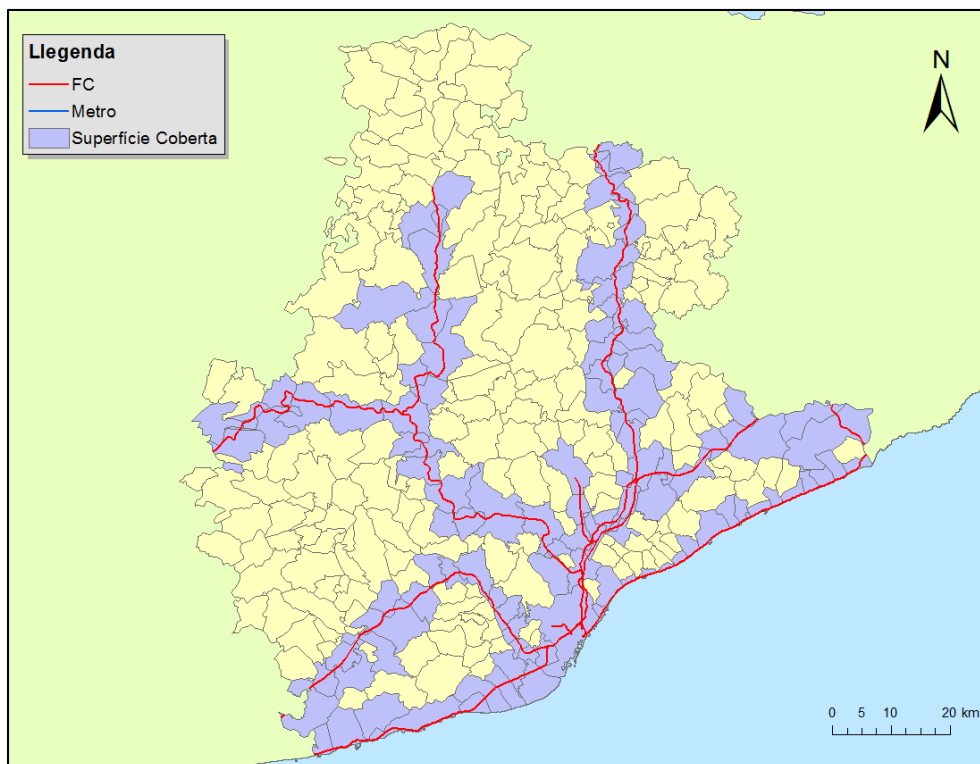
Resultats 5.2. Cobertura mètode 2, període 9



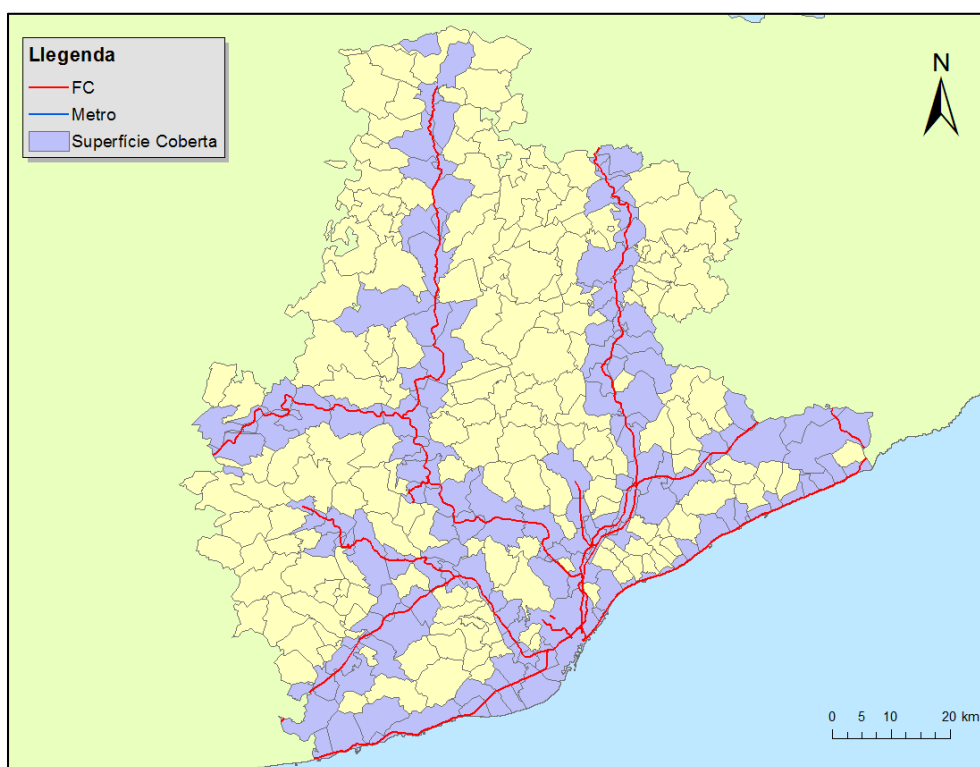
Resultats 5.2. Cobertura mètode 4, període 1



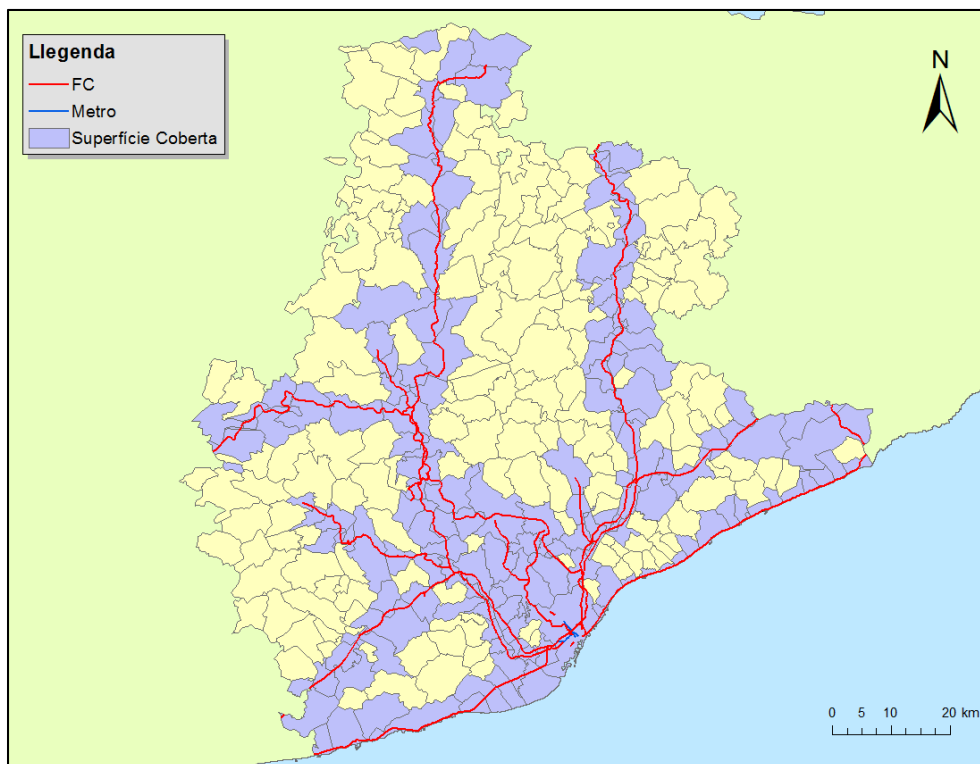
Resultats 5.2. Cobertura mètode 4, període 2



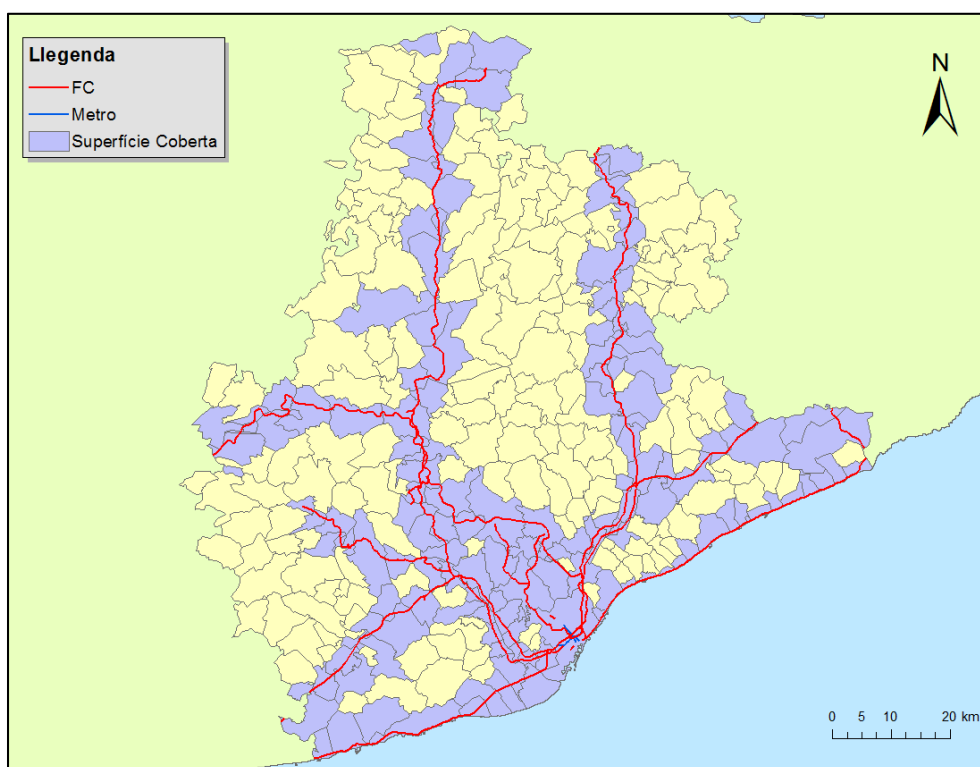
Resultats 5.2. Cobertura mètode 4, període 3



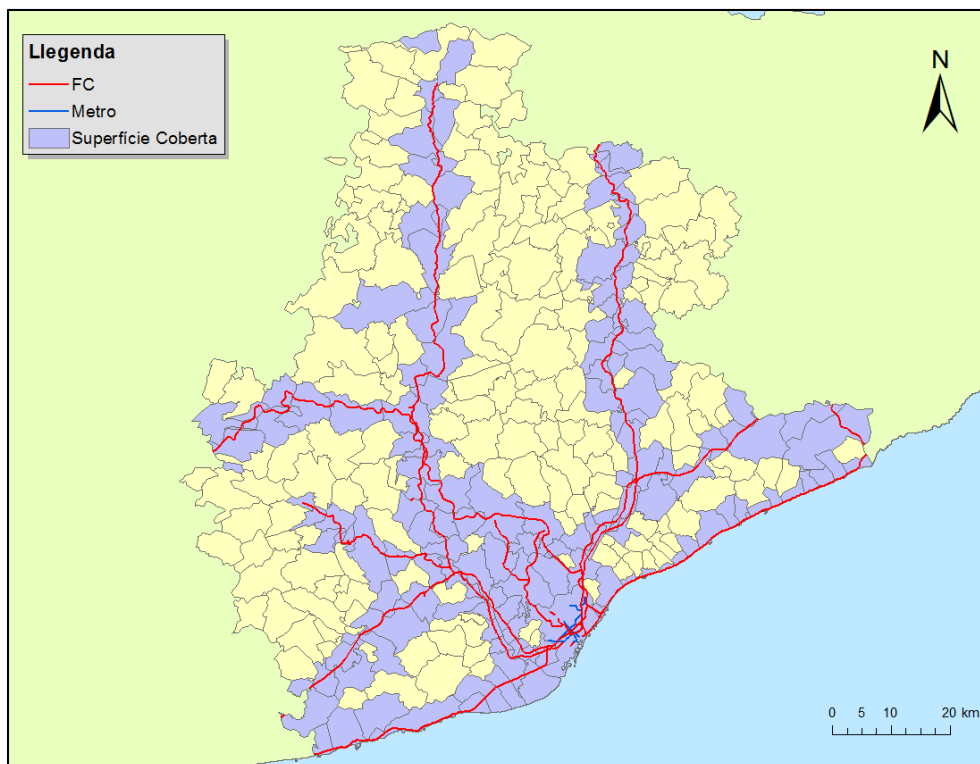
Resultats 5.2. Cobertura mètode 4, període 4



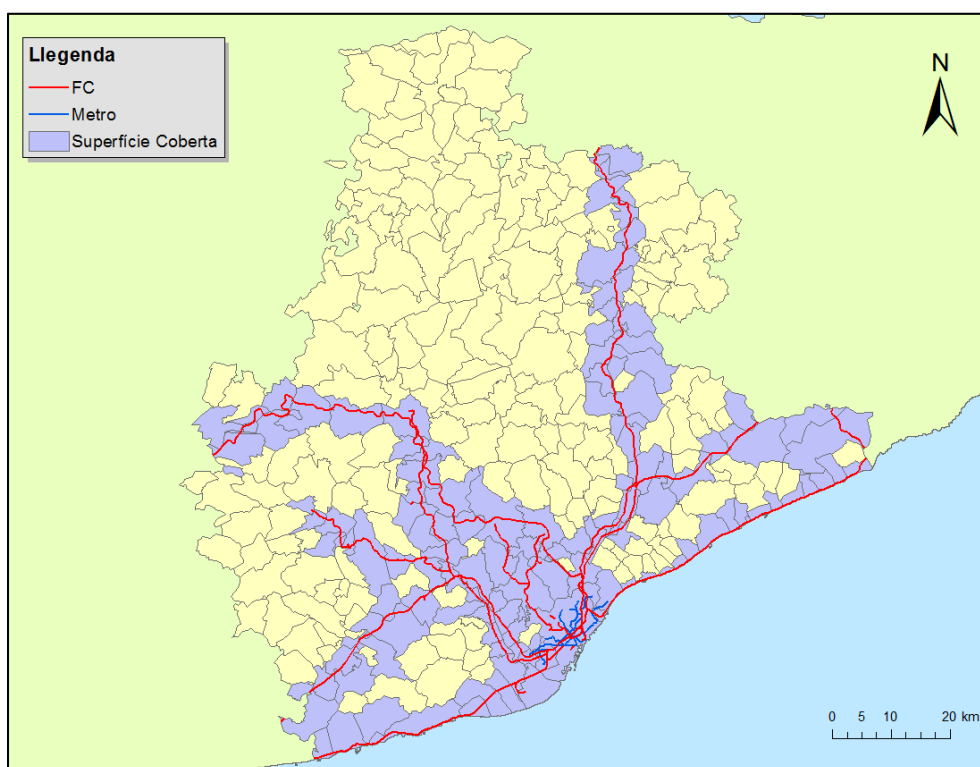
Resultats 5.2. Cobertura mètode 4, període 5



Resultats 5.2. Cobertura mètode 4, període 6

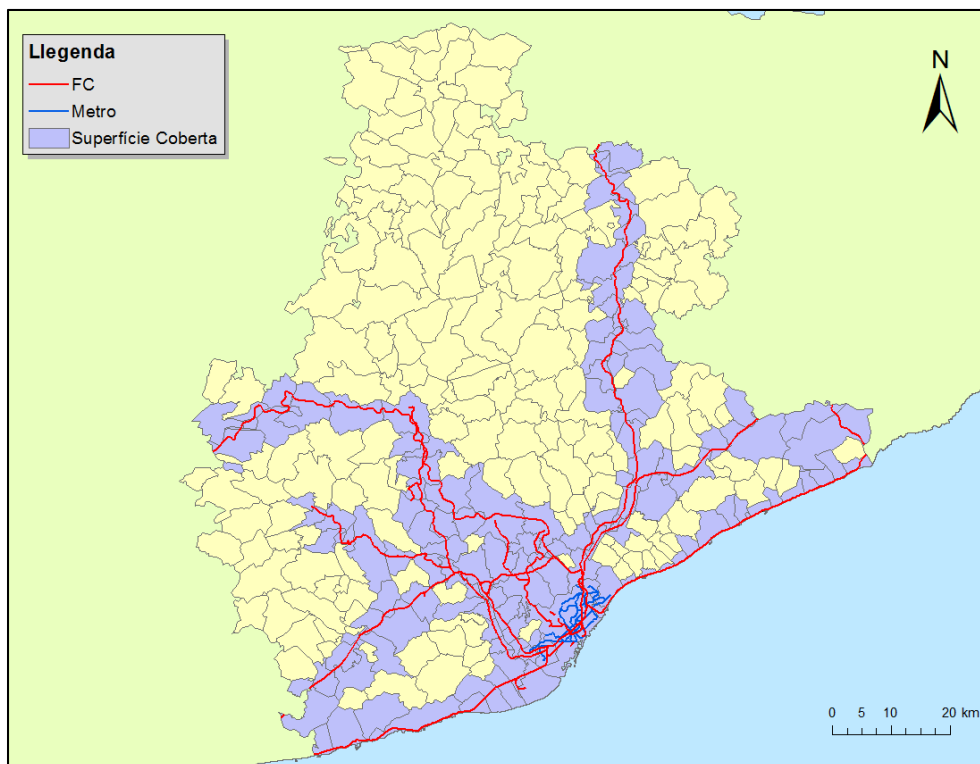


Resultats 5.2. Cobertura mètode 4, període 7

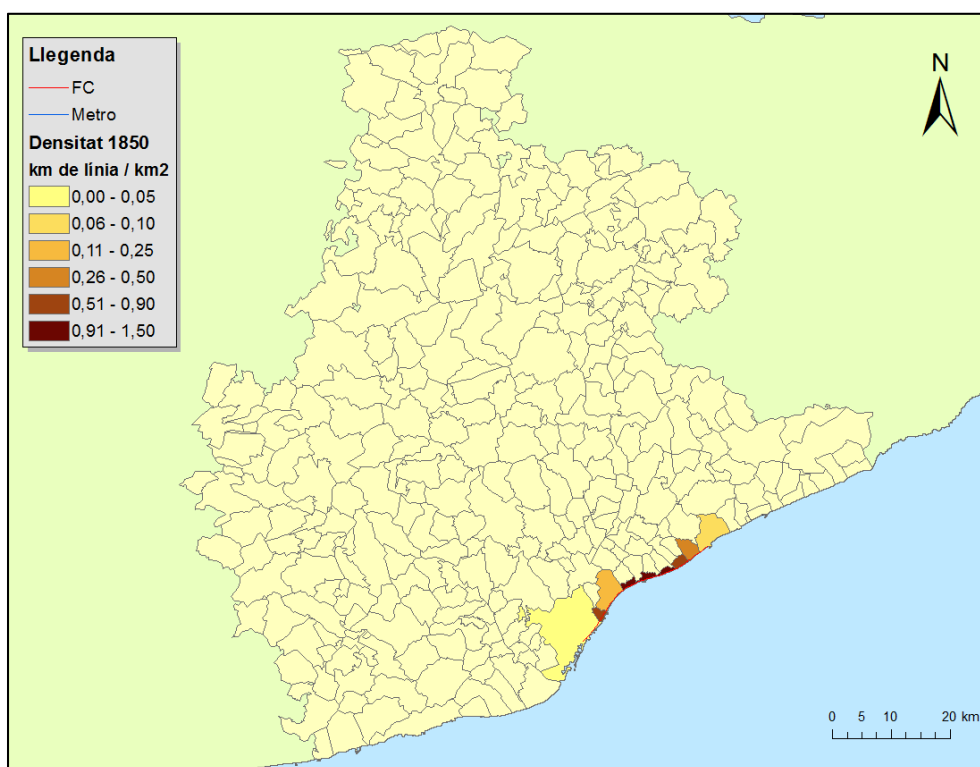


Resultats 5.2. Cobertura mètode 4, període 8



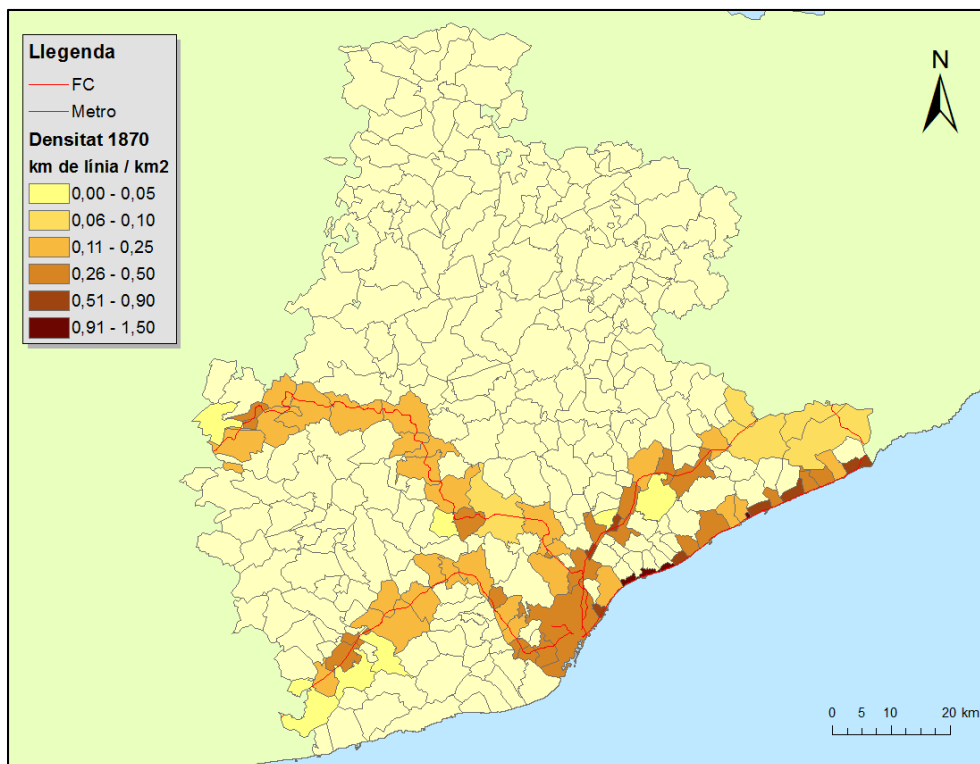


Resultats 5.2. Cobertura mètode 4, període 9

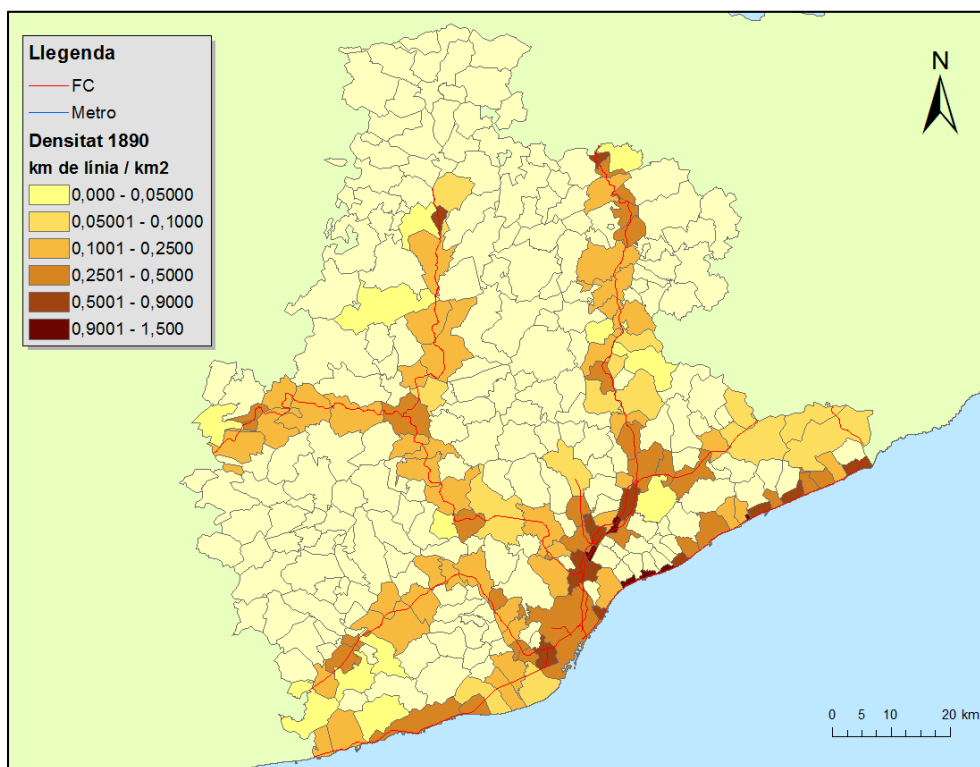


Resultats 5.4. Densitat període 1

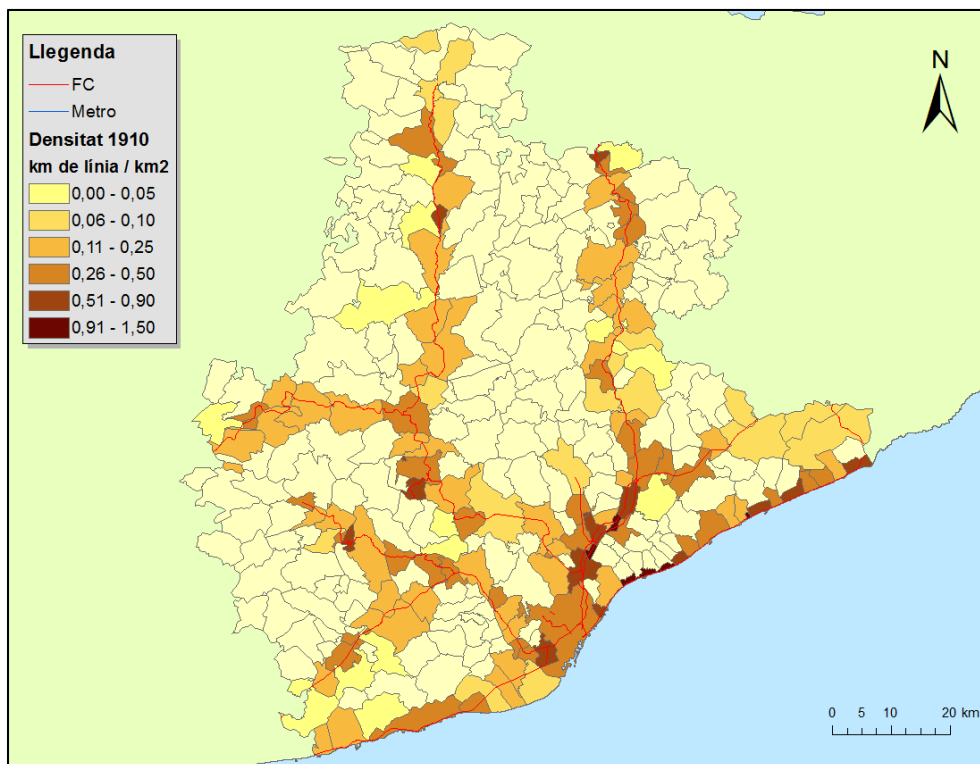




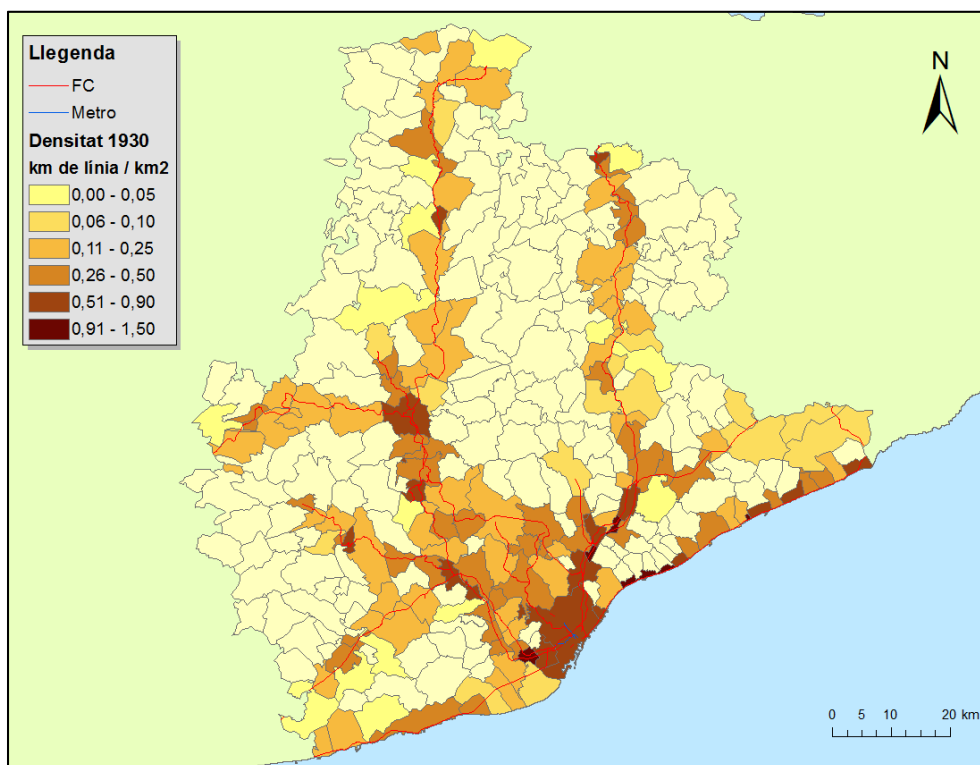
Resultats 5.4. Densitat període 2



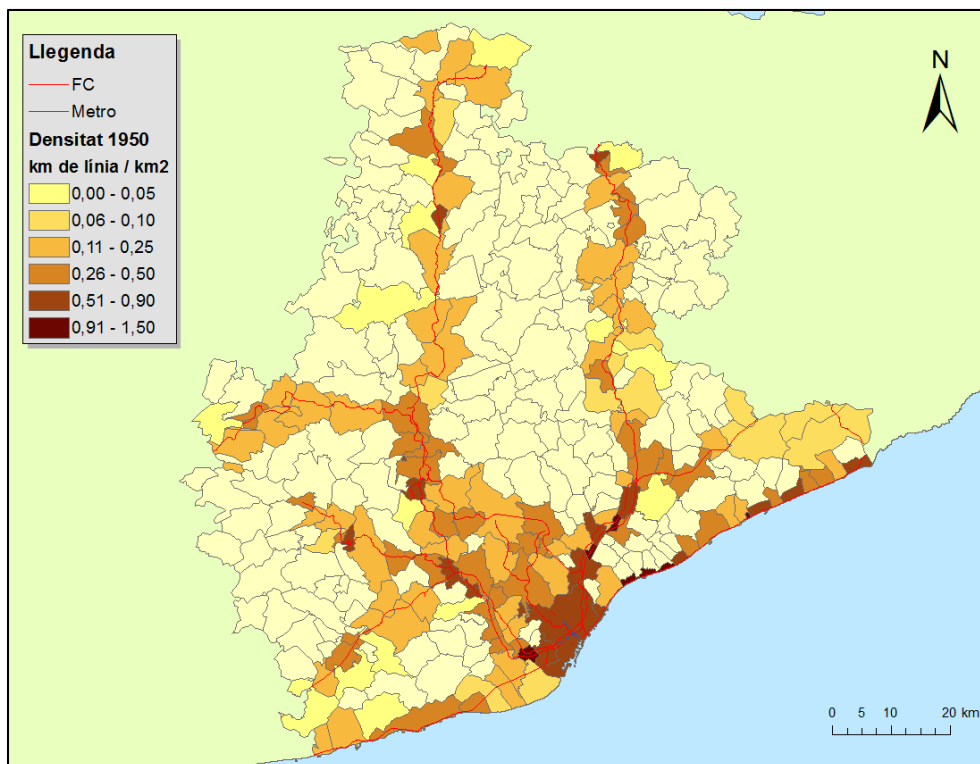
Resultats 5.4. Densitat període 3



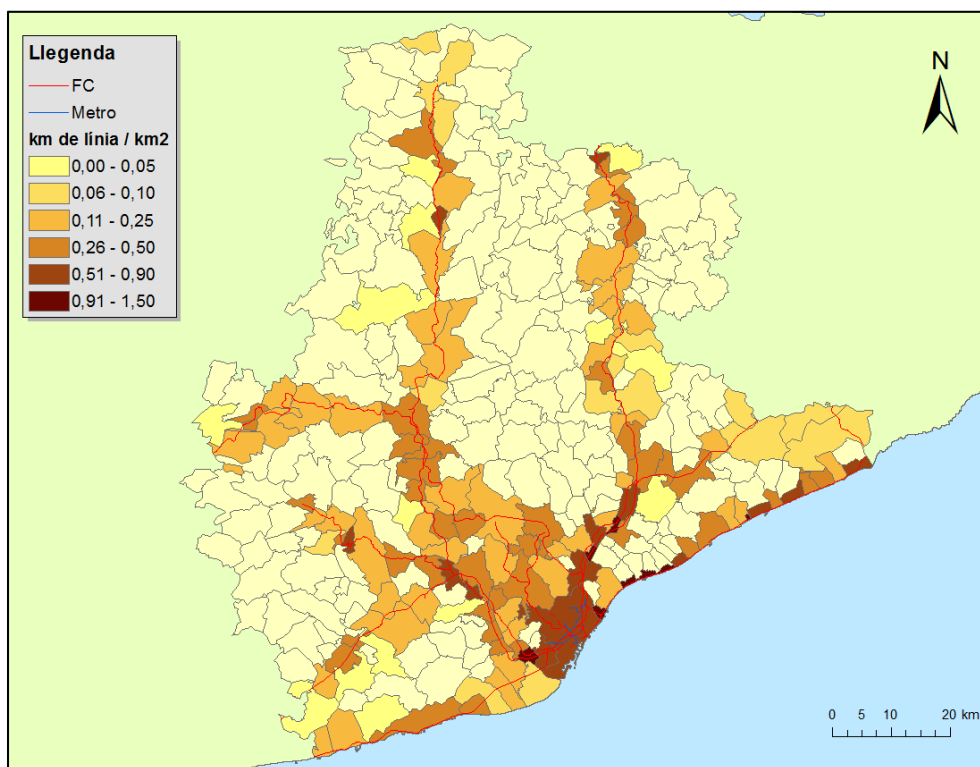
Resultats 5.4. Densitat període 4



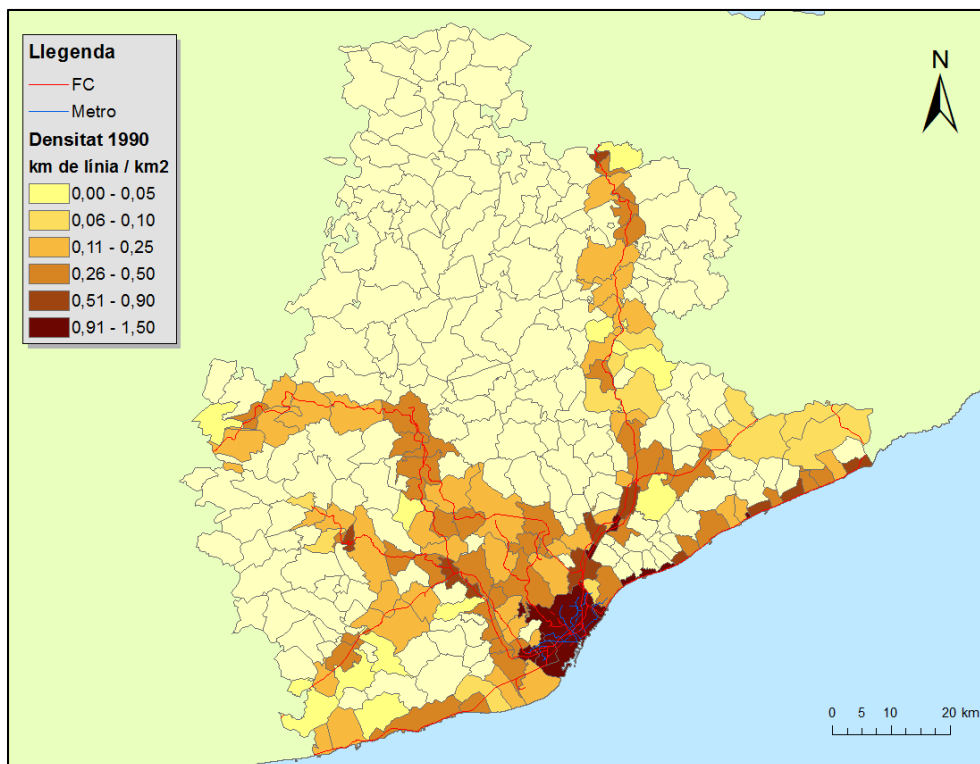
Resultats 5.4. Densitat període 5



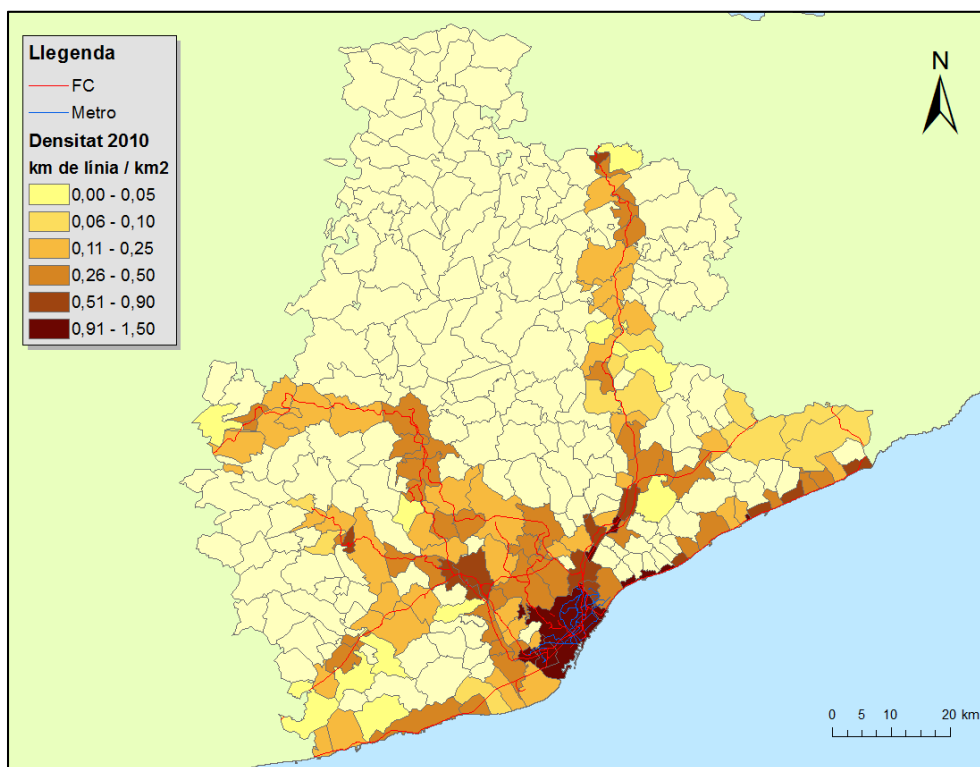
Resultats 5.4. Densitat període 6



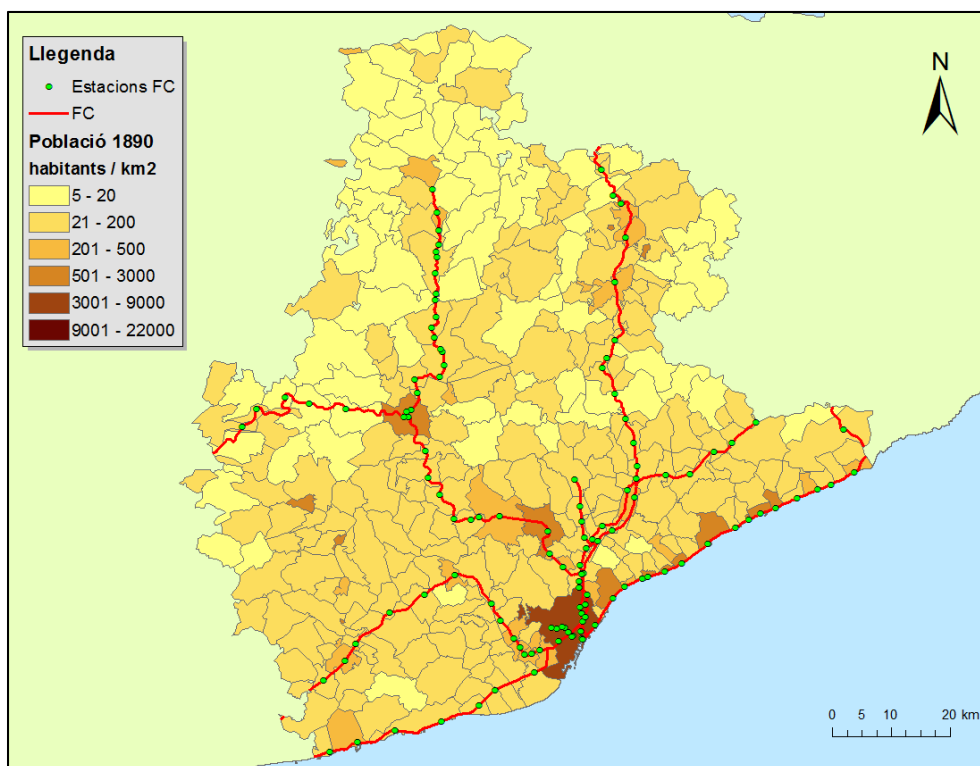
Resultats 5.4. Densitat període 7



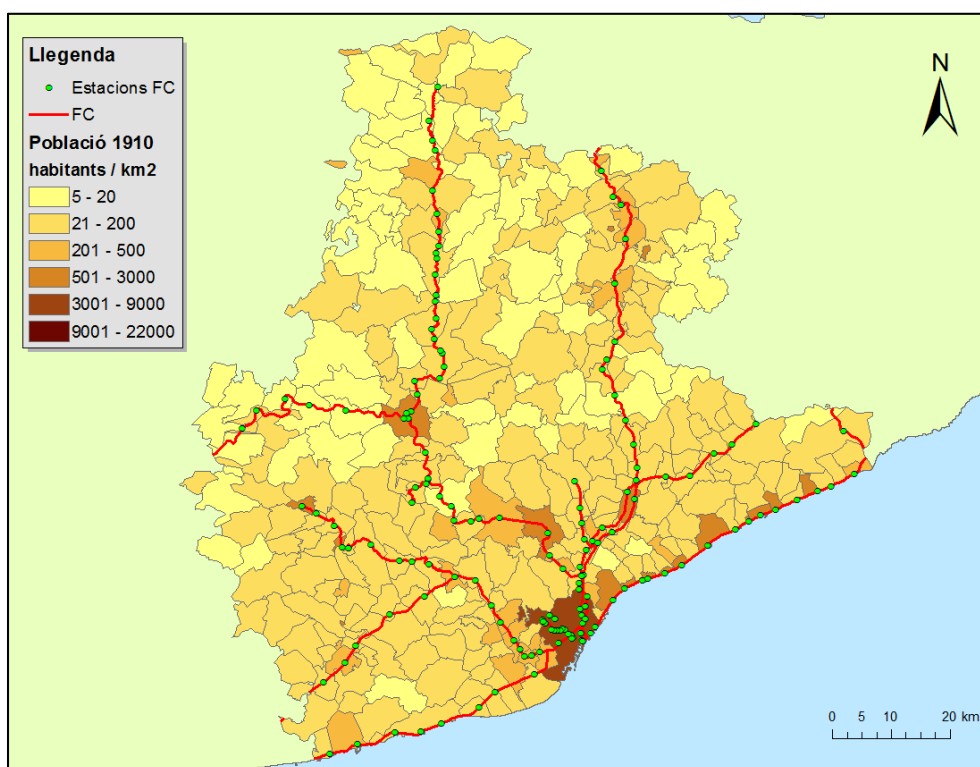
Resultats 5.4. Densitat període 8



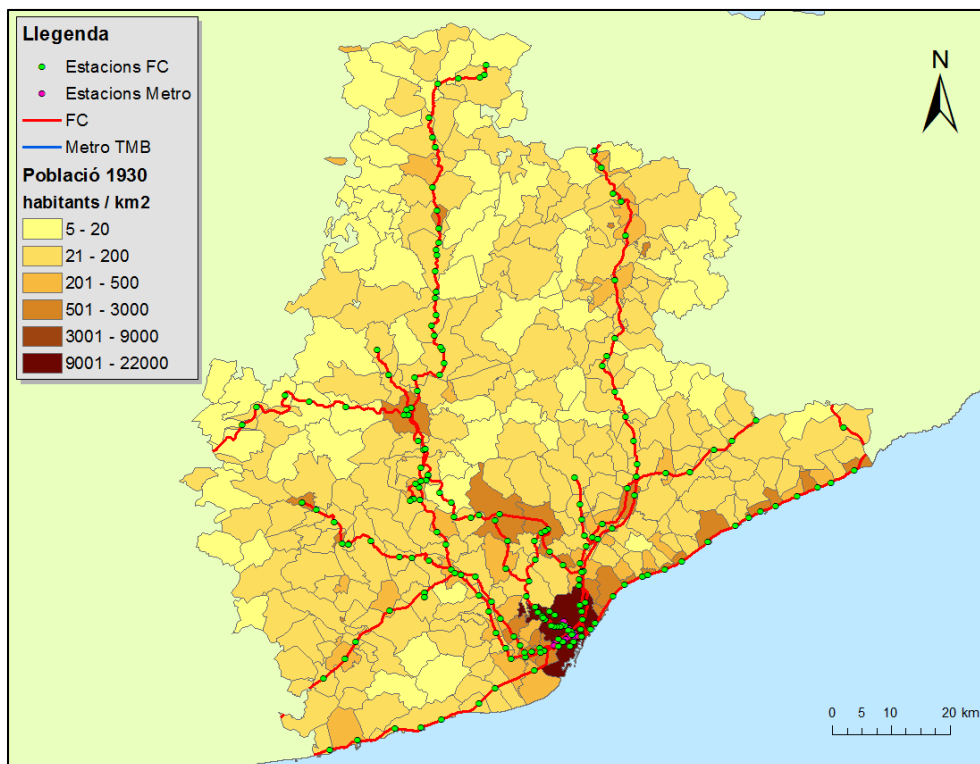
Resultats 5.4. Densitat període 9



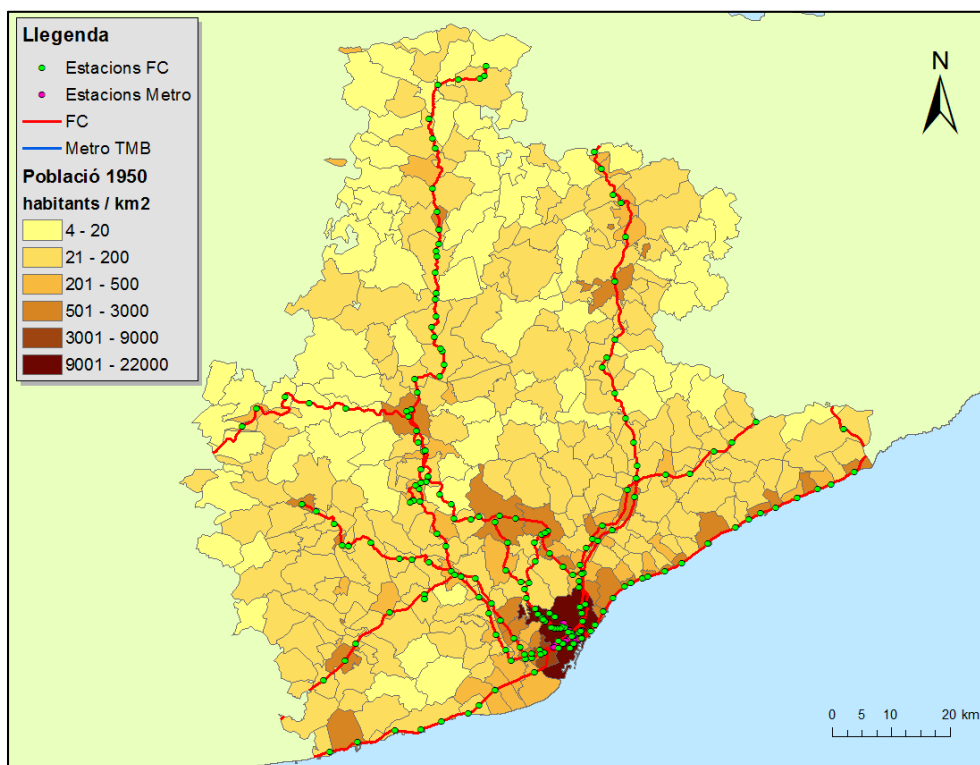
Resultats 5.4. Població període 3



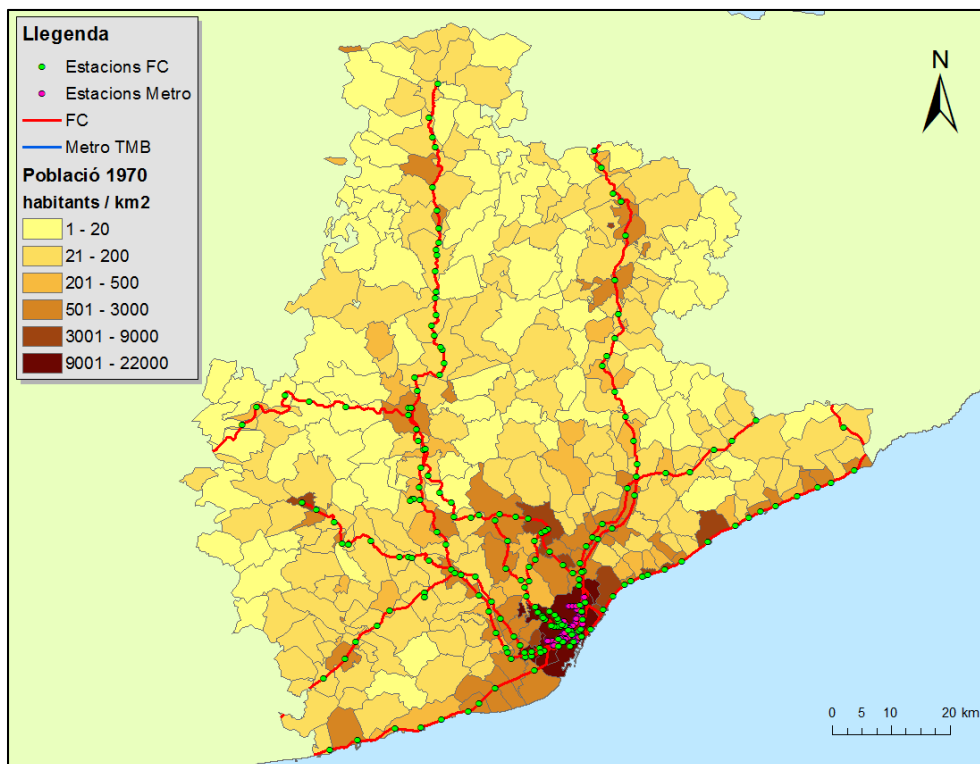
Resultats 5.4. Població període 4



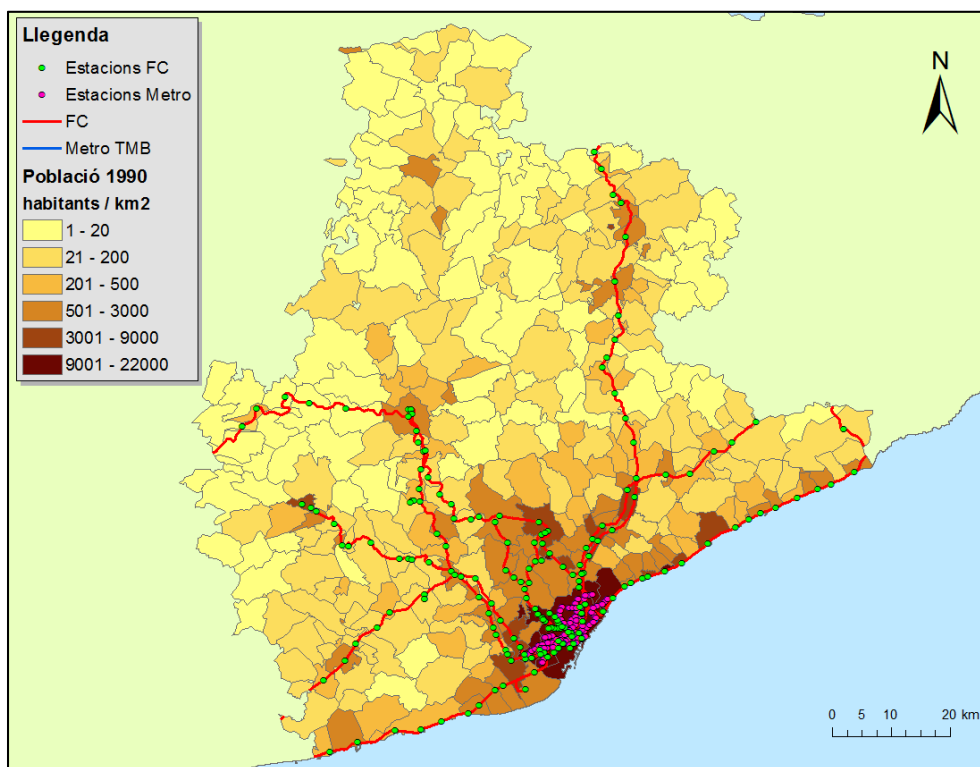
Resultats 5.4. Població període 5



Resultats 5.4. Població període 6

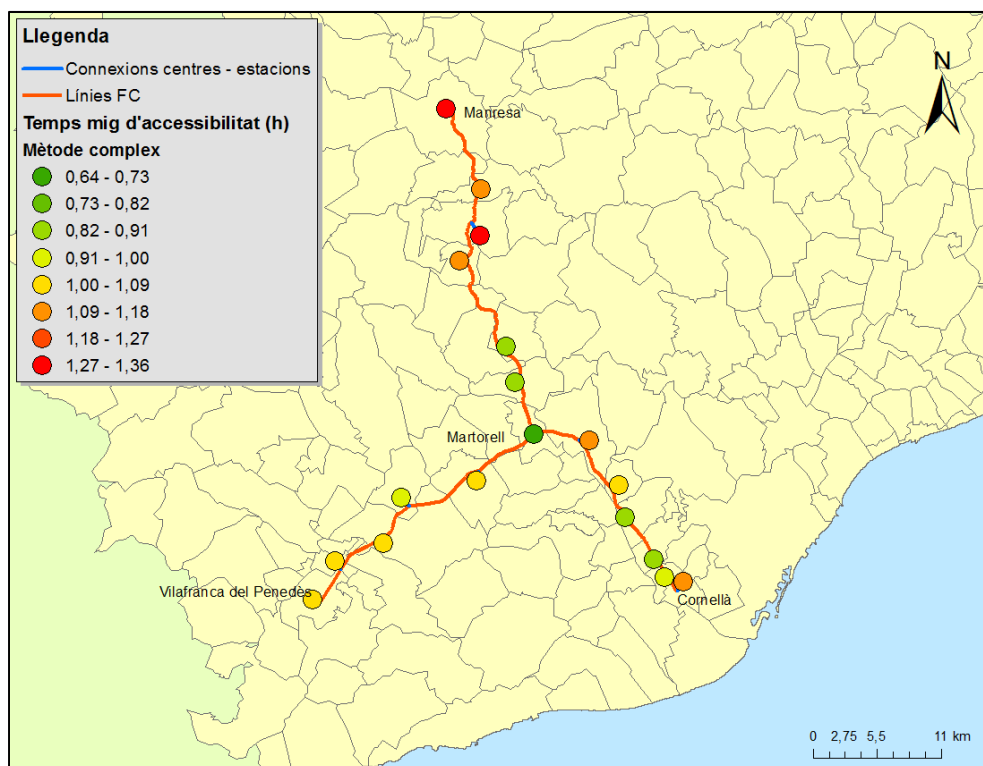


Resultats 5.4. Població període 7

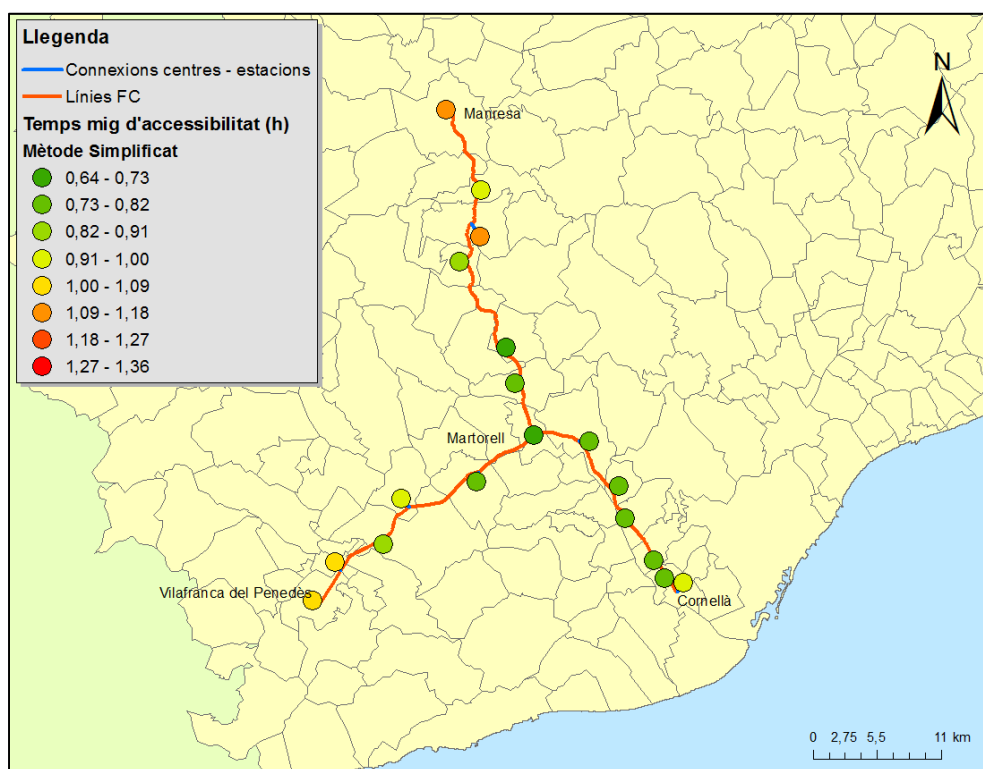


Resultats 5.4. Població període 8



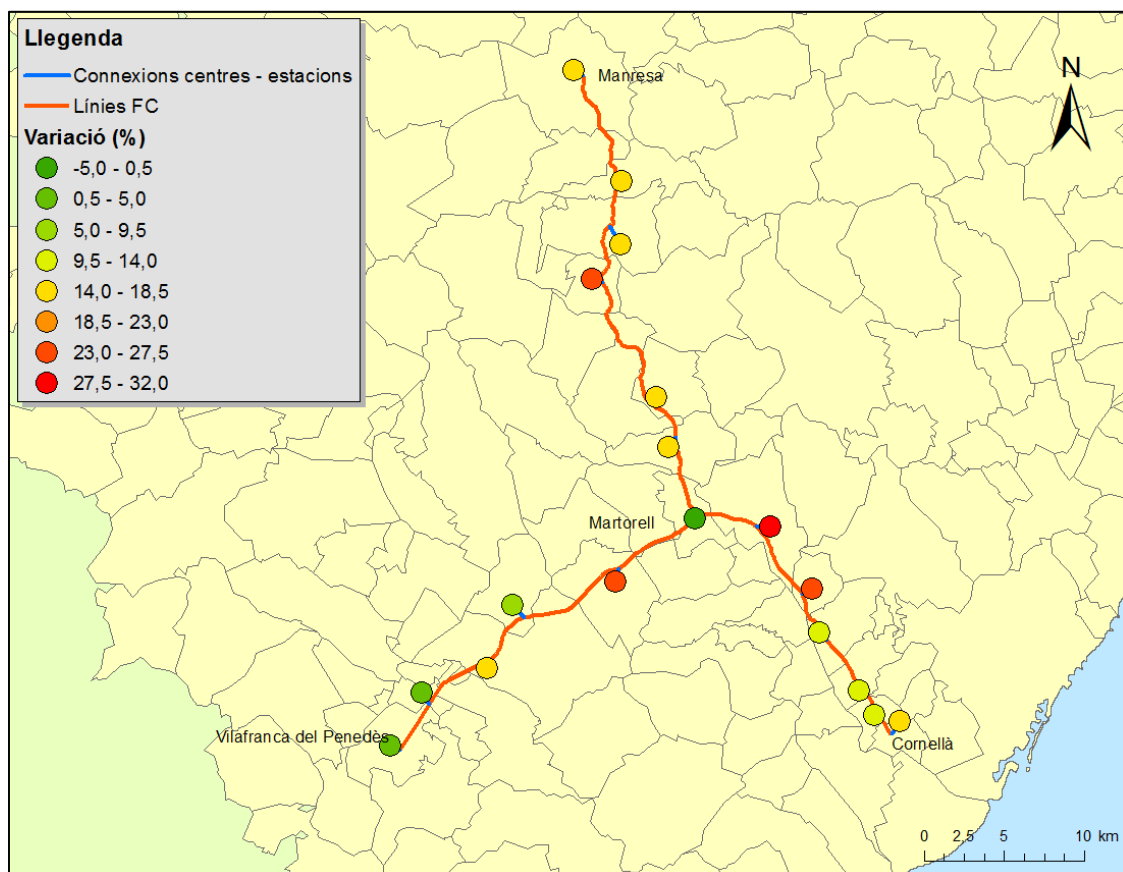


Resultats 5.5. Temps mig d'accessibilitat mètode complex



Resultats 5.5. Temps mig d'accessibilitat mètode simplificat





Resultats 5.5. Variacions del temps mig d'accessibilitat entre mètodes